

Министерство образования и науки Российской Федерации
федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Инженерная школа энергетики

Отделение Электроэнергетики и электротехники

Направление подготовки 13.03.02 - Электроэнергетика и электротехника (бакалавриат)

Профиль Электропривод и автоматика

БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

Тема работы
Регулируемый электропривод погружного насоса

УДК 62-83-523:621.671

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
3-5ГЗА1	Зайцев Игорь --		

Руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ст. преподаватель	Ляпушкин С.В.	к.т.н.		

КОНСУЛЬТАНТЫ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Попова С.Н.	к.э.н.		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент	Мезенцева И.Л.			

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Руководитель Отделения	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор	Дементьев Ю.Н.	Ph.D, доцент		

Томск – 2018 г.

Министерство образования и науки Российской Федерации
федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Инженерная школа энергетики

Отделение Электроэнергетики и электротехники

Направление подготовки 13.03.02 - Электроэнергетика и электротехника (бакалавриат)

Профиль Электропривод и автоматика

УТВЕРЖДАЮ:

Зав. отделением

(Подпись)

(Дата)

Ю.Н. Дементьев
(Ф.И.О.)

ЗАДАНИЕ

на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

Бакалаврской работы

(бакалаврской работы, дипломного проекта/работы, магистерской диссертации)

Студенту:

Группа	ФИО
З-5ГЗА1	Зайцеву Игорю --

Тема работы:

Регулируемый электропривод погружного насоса	
Утверждена приказом директора (дата, номер)	№ 856/с от 08.02.2018г

Срок сдачи студентом выполненной работы:	01.06.2018г.
--	--------------

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

Исходные данные к работе	Материалы преддипломной практики, техническая литература, техническая документации
---------------------------------	--

Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов	Введение; описание технологического процесса; обоснование и выбор системы электропривода; выбор элементов и расчет параметров силового канала регулируемого электропривода; расчет статических и динамических характеристик, Исследование имитационной модели асинхронного электропривода погружного насоса, социальная ответственность проекта; финансовый менеджмент; заключение.
Перечень графического материала	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Схема электрическая принципиальная; ▪ Схема электрическая функциональная; ▪ Схема электрическая структурная; ▪ Имитационная модель ПЭД; ▪ Техничко-экономические показатели;
Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы	
Раздел	Консультант
«Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»	Попова Светлана Николаевна
«Социальная ответственность»	Мезенцева Ирина Леонидовна
Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:	
Заключение	

Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику	05.04.2018г..
--	---------------

Задание выдал руководитель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ст. преподаватель	Ляпушкин С.В.	к.т.н.		05.04.2018г.

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
3-5Г3А1	Зайцев Игорь --		05.04.2018г.

РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа содержит 94 с., 241 рисунок., 7 таблиц., 25 источник и 1 приложение.

ПОГРУЖНОЙ ЦЕНТРОБЕЖНЫЙ НАСОС, ЭЛЕКТРОПРИВОД, АСИНХРОННЫЙ ПОГРУЖНОЙ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЬ, ЧАСТОТНЫЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ, ИММИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ.

Объектом исследования является асинхронный электропривод погружного насоса.

Цель работы – спроектировать регулируемый электропривод переменного тока для погружного центробежного насоса.

В процессе работы был произведён расчёт и выбор электрооборудования для привода.

Для управления электроприводом принята система управления асинхронным двигателем со скалярным принципом управления.

Проведены исследования в области статики и динамики системы с помощью численного моделирования на ЭВМ.

Предприняты меры по обеспечению безопасности при работе с объектом управления.

Определена стоимость пусконаладочных работ, также выполнен расчет экономии электроэнергии.

Выпускная квалификационная работа выполнена в текстовом редакторе Microsoft Office Word 2007 на листах белой бумаги формата А4 с помощью программных сред Matlab 7.0.

Содержание	
Введение	8
Скважинные насосы	9
1. АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩИХ СХЕМ И КОНСТРУКЦИЙ	17
Краткая характеристика скважин	17
1.2 Состав и комплектность установки электропривода центробежного насоса.	17
РАСЧЕТНАЯ ЧАСТЬ	19
2.1. Определение параметров погружного насоса	19
2.2. Выбор двигателя	19
2.3. Определение параметров схемы замещения асинхронного двигателя по каталожным данным	20
2.4. Расчет и построение электромеханических характеристик	26
2.5. Расчет и построение механической характеристики	27
ВЫБОР ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ЧАСТОТЫ	30
2.6.1. Особенности применения ПЧ в системе «ПЧ – трансформатор - погружной двигатель»	30
2.6.2. Дополнительные возможности станции управления с преобразователем частоты	33
2.7. Математическое описание обобщенной асинхронной машины	34
3 Имитационное моделирование	41
3.1. Математическое описание погружного асинхронного двигателя	41
3.2. Анализ асинхронного погружного электродвигателя в неподвижной системе координат	46
3.3. Анализ ПЭД во вращающейся системе координат	49
4 РАСЧЕТ И ВЫБОР КАБЕЛЬНОЙ ЛИНИИ УЭЦН	55
4.1. Схема замещения кабельной линии	55
4.2. Расчет параметров схемы замещения	57
5. ВЫБОР ТРАНСФОРМАТОРА ДЛЯ ПИТАНИЯ ПОГРУЖНОГО НАСОСА	59
ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»	60
6.СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ	62
ВВЕДЕНИЕ	62
6.1 Производственная безопасность	62
6.1.1 Анализ выявленных вредных факторов проектируемой производственной среды.	63
6.2 Анализ выявленных опасных факторов, которые могут возникнуть при эксплуатации объекта исследования	67
6.3 Экологическая безопасность	69
6.4 Защита при ЧС	70
6.5 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности	70
ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ»	73
7.1 Планирование работ по реализации технического проекта	74

7.1.1	Определение трудоемкости выполнения работ	75
7.1.2	Разработка графика выполнения технического проекта	76
7.2	Составление сметы технического проекта	79
7.2.1	Полная заработная плата исполнителей	79
7.2.2	Отчисления во внебюджетный фонды (страховые отчисления)	81
7.2.3	Накладные расходы	81
7.2.4	Формирование сметы технического проекта	82
	ЗАКЛЮЧЕНИЕ	83
	CONCLUSION	84
	СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	85
	Приложение А	88

Технические требования

Для погружного центробежного насоса спроектировать регулируемый электропривод переменного тока.

Погружной центробежный насос предназначен для откачки пластовой жидкости из газовых скважин.

1. Должен обеспечивать стабильную скорость при диапазоне регулирования $D = 1:2$;
2. Время разгона $t = 1\text{ с}$;
3. Погрешность скорости при изменении нагрузки не более 10%;
4. Напряжение питающей сети 0,4 кВ частота сети 50 Гц;
5. Электропривод должен иметь следующие виды защит;
 - От токов короткого замыкания;
 - От токов перегрузки;
 - От перенапряжений;

Введение

Разработка бесштанговых насосов в нашей стране началась еще до революции. Когда А.С. Артюнов вместе с В.К. Домовым разработали скважинный агрегат, в котором центробежный насос приводился в действие погружным электродвигателем. Советские инженеры, начиная с 20-х годов, предлагали разработку поршневых насосов с поршневым пневматическим двигателем. Одним из первых такие насосы разработал М.И. Марцишевский.

Разработка скважинного насоса с пневмодвигателем была продолжена в Азинмаше В.И. Документовым. скважинные центробежные насосы с электроприводом разрабатывались в предвоенный период А.А.Богдановым, А.В. Крыловым, Л.И. Штурман. Промышленные образцы центробежных насосов с электроприводом были разработаны в особом конструкторском бюро по бесштанговым насосам. Эта организация ведет все работы по скважинным бесштанговым насосам, в том числе и по винтовым, диафрагменным и др.

Нефтегазодобывающая промышленность с открытием новых месторождений нуждалась в насосах для отбора из скважины большого количества жидкости. Естественно, что наиболее рационален лопастной насос, приспособленный для больших подач. Из лопастных насосов получили распространение насосы с рабочими колесами центробежного типа, поскольку они давали большой напор при заданных подачах жидкости и габаритах насоса. Широкое применение скважинных центробежных насосов с электроприводом обусловлено многими факторами. При больших отборах жидкости из скважины установки ЭЦН наиболее экономичные и наименее трудоемки при обслуживании, по сравнению с компрессорной добычей и подъемом жидкости насосами других типов. При больших подачах энергетические затраты на установку относительно невелики. Обслуживание установок ЭЦН просто, так как на поверхности размещаются только станция управления и трансформатор, не требующие постоянного ухода.

Монтаж оборудования ЭЦН прост, так как станция управления и трансформатор не нуждаются в устройстве фундаментов. Эти два узла установки ЭЦН размещают обычно в легкой будке.

Скважинные насосы

По принципу перекачивания жидкости скважинные насосы относятся к группе многоступенчатых вертикальных насосов.

Установка скважинных насосов в трубчатых колодцах и буровых скважинах предопределяет особенности их конструкции. Эти насосы должны иметь минимальные поперечные размеры, а их внешняя форма должна соответствовать форме круглых обсадных труб, внутри которых их устанавливают. Скважинные насосы изготовляют двух типов: насосы с трансмиссионным валом и погружные насосы.

Погружной насос представляет собой агрегат, состоящий из центробежного многоступенчатого насоса и погружного электродвигателя с жестким соединением их валов. Таким образом, отпадает необходимость в длинном трансмиссионном вале.

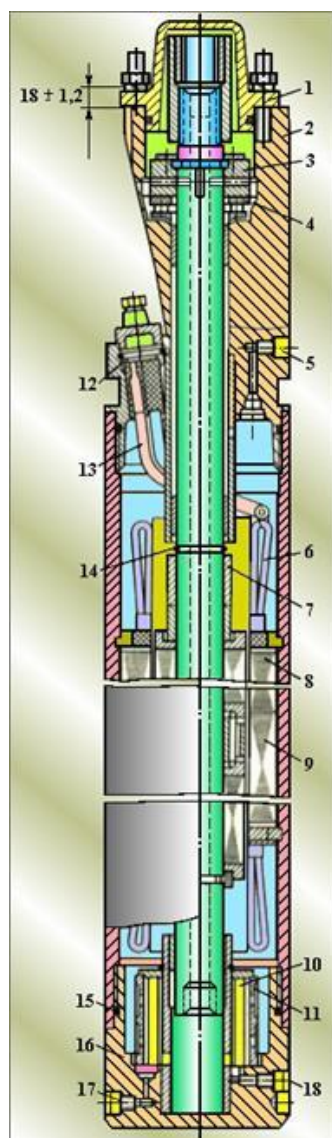
Насосный агрегат подвешивают в скважине на колонне водоподъемных труб и опускают в воду на такую глубину, чтобы верхний фланец клапанной коробки находился ниже динамического уровня в скважине не менее чем на 1,5 м. Днище электродвигателя должно находиться выше фильтра скважины не менее чем на 1 м.

Для забора воды из артезианских скважин в Советском Союзе применяют погружные насосы восьми типов: ЭЦВ, АПТ, АП, АПВ, АПВМ, АЭНП, ЭНП, ГНОМ. В настоящее время насосы АПТ, АП, АПВ, АПВМ, ЭНП снимаются с производства и заменяются насосами ЭЦВ.

Погружные электронасосы для воды ЭЦВ выпускаются в соответствии с ГОСТ 10428—79, который предусматривает их изготовление свыше 100 типоразмеров для скважин диаметром 100—500 мм, с подачей воды 0,63—1200 м³/ч, напором 12—1680 м, с общей минерализацией не более 1500 мг/л (сухой остаток), рН = 6,5—9,5, с температурой до 25° С и содержанием

хлоридов не более 350 мг/л, сульфидов не более 500 мг/л, сероводорода не более 1,5 мг/л.

На рисунке 1 показан ПЭД.



1. Крышка.
2. Головка
3. Пята
4. Подпятник
5. Пробка
6. Обмотка статора
7. Втулка
8. Ротор
9. Статор
10. Магнит
11. Фильтр
12. Колодка
13. Кабель с наконечником
14. Кольцо
15. Кольцо уплотнительное
16. Корпус
17. Пробка
18. Пробка

Рисунок 1-Погружной электродвигатель..

Погружные двигатели состоят из электродвигателя и гидрозащиты. Двигатели трехфазные асинхронные короткозамкнутые двухполюсные погружные унифицированной серии ПЭД в нормальном и коррозионностойком исполнениях, климатического исполнения В, категории размещения 5 работают от сети переменного тока частотой 50 Гц и используются в качестве привода погружных центробежных насосов в модульном исполнении для откачки пластовой жидкости из нефтяных скважин.

Двигатели предназначены для работы в среде пластовой жидкости (смесь нефти и попутной воды в любых пропорциях) с температурой до 110 °С, содержащей: механические примеси с относительной твердостью частиц не более 5 баллов по шкале Мооса - не более 0,5 г/л; сероводород: для нормального исполнения - не более 0,01 г/л; для коррозионностойкого исполнения - не более 1,25 г/л; свободный газ (по объему) - не более 50%. Гидростатическое давление в зоне работы двигателя не более 20 МПа. Допустимые отклонения от номинальных значений питающей сети: по напряжению - от минус 5% ДО плюс 10%; по частоте переменного тока - $\pm 0,2$ Гц; по току - не выше номинального на всех режимах работы, включая вывод скважины на режим. В шифре двигателя ПЭДУСК-22-103ДВ5 ТУ 16-652.029 - 86 приняты следующие обозначения: ПЭДУ - погружной электродвигатель унифицированный; С - секционный (отсутствие буквы - несекционный); К - коррозионностойкий (отсутствие буквы - нормальное); 22 - мощность, кВт; 103 - диаметр корпуса, мм; Д - шифр модернизации гидрозащиты (отсутствие буквы - основная модель); В5 - климатическое исполнение и категория размещения. В шифре электродвигателя ЭДК22-103В приняты следующие обозначения: ЭД - электродвигатель; К - коррозионностойкий (отсутствие буквы - нормальное исполнение); 22 - мощность, кВт; 103 - диаметр корпуса, мм; В - верхняя секция (отсутствие буквы - несекционный, С - средняя секция, Н - нижняя секция). Пуск, управление работой двигателями и его защита при аварийных режимах осуществляются специальными комплектными устройствами. Предельная длительно допускаемая температура обмотки статора электродвигателей (по сопротивлению для электродвигателей диаметром корпуса 103 мм) равна 170 °С, а остальных электродвигателей - 160 °С. Электродвигатель состоит из статора, ротора, головки с токовводом, корпуса. Статор выполнен из трубы, в которую запрессован магнитопровод, изготовленный из листовой электротехнической стали. Обмотка статора - однослойная протяжная катушечная. Фазы обмотки соединены в звезду. Ротор

короткозамкнутый, многосекционный. В состав ротора входят вал, сердечники, радиальные опоры (подшипники скольжения), втулка. Вал пустотелый, изготовлен из высокопрочной стали со специальной отделкой поверхности. В центральное отверстие вала ротора верхнего и среднего электродвигателей ввинчены две специальные гайки, между которыми помещен шарик, перекрывающий слив масла из электродвигателя при монтаже. Сердечники выполнены из листовой электротехнической стали. В пазы сердечников уложены медные стержни, сваренные по торцам с короткозамыкающими кольцами. Сердечники набираются на вал, чередуясь с радиальными подшипниками. Набор сердечников на валу зафиксирован с одной стороны разрезным вкладышем, а с другой - пружинным кольцом. Втулка служит для смещения радиальных подшипников ротора при ремонте электродвигателя. Головка представляет собой сборочную единицу, монтируемую в верхней части электродвигателя (над статором). В головке расположен узел упорного подшипника, состоящий из пяты и подпятника, крайние радиальные подшипники ротора, узел токоввода (для несекционных электродвигателей) или узел электрического соединения электродвигателей (для секционных электродвигателей). Токоввод - изоляционная колодка, в пазы которой вставлены кабели с наконечниками. Узел электрического соединения обмоток верхнего, среднего и нижнего электродвигателей состоит из выводных кабелей с наконечниками и изоляторов, закрепленных в головках и корпусах торцов секционирования. Отверстие под пробкой служит для закачки масла в протектор при монтаже двигателя. В корпусе, находящемся в нижней части электродвигателя (под статором), расположены радиальный подшипник ротора и пробки. Через отверстия под пробку проводят закачку и слив масла в электродвигатель. В этом корпусе электродвигателей имеется фильтр для очистки масла. Термоманометрическая система ТМС-Электон предназначена для контроля некоторых технологических параметров скважин, оборудованных УЭЦН, и защиты погружных агрегатов от аномальных режимов работы (перегрев электродвигателя или снижение

давления жидкости на приеме насоса ниже допустимого). Система ТМС-Электон состоит из погружного бдока, трансформирующего давление и температуру в частотно-манипулированный электрический сигнал, и наземного прибора, осуществляющего функции блока питания, усилителя-формирователя сигналов и устройства управления режимом работы погружным электронасосом по давлению и температуре. Скважинный блок давления и температуры (ТМСП) выполнен в виде цилиндрического герметичного контейнера, размещаемого в нижней части электродвигателя и подключенного к нулевой точке его статорной обмотки. Наземный блок, устанавливаемый в комплектное устройство Электон, обеспечивает формирование сигналов на ее отключение и выключение насоса по давлению и температуре, а также измерение сопротивления изоляции. В качестве линии связи и энергопитания ТМСП используется силовая сеть питания погружного электродвигателя. Система имеет интерфейсы –RS 232 RS 485 для подключения компьютеров и может использоваться для передачи данных на другие устройства.

Погружные насосы по сравнению с артезианскими с трансмиссионными валами имеют ряд преимуществ:

- исключается необходимость применения длинного вертикального вала с промежуточными подшипниками, уменьшается металлоемкость насоса;

- отсутствие трансмиссионного вала позволяет применять погружные насосы в искривленных скважинах;

- упрощается конструкция водоподъемного трубопровода, монтаж и демонтаж насосной установки;

- уменьшается площадь павильона над скважиной.

Вследствие этих преимуществ погружные насосы находят широкое применение для подъема воды из трубчатых колодцев и постепенно вытесняют трансмиссионные насосы.

Отрасли применения скважинных насосов

- ЖКХ
- Горно-химическая
- Угледобывающая
- Водоснабжение
- Понижение уровня вод в карьерах
- Водопонижение в шахтах и рудниках
- Процессы выщелачивания
- Добыча урана
- Подача морской, сенноманской, минеральной воды
- Системы пожаротушения
- Шахтный и участковый водоотлив при подземных горных работах
- Водоотлив при строительстве подземных хранилищ в соляных штоках методом растворения
- Насосы работают на многих объектах СНГ
- Водопонижение минеральной воды на Коршуновском ГОК. Компания Мечел
- Водопонижение при добыче Алмазов в компании Алроса
- Откачка воды из Шахт. Компания Норильский Никель
- Добыча метана из угольных пластов. Газпром добыча Кузнецк

УЭЦН для добычи метана из угольных пластов

При данном виде добычи в пласте бурятся вертикальные, наклонные и горизонтальные скважины. Затем ниже зоны перфорации с целью откачки избытка воды из пласта и максимального снижения противодавления на него (для свободного выхода метана) происходит спуск УЭЦН. Таким образом обеспечивается высокоэффективная добыча жидкости из скважин со снижением капитальных и операционных затрат. Также снижается риск загрязнения среды газовых месторождений.

Применение:

- откачка избыточной жидкости из скважин для добычи угольного метана.

Преимущества:

- увеличенная наработка в осложнённых условиях эксплуатации ниже зоны перфорации;
- надежная работа при высоком содержании частиц угля в жидкости;
- возможность эксплуатации в скважинах с температурой 200°C при ограниченном дебите;
- наличие малогабаритных УЭЦН под обсадные колонны диаметром 102, 114 и 127 мм;
- уменьшение общих расходов как на оборудование, так и на сам процесс бурения.

Особенности:

- износостойкое исполнение ЭЦН;
- комплектация погружного двигателя кожухом для эффективного охлаждения ;
- наличие фильтра для снижения попадания в рабочие органы насоса угольных частиц;

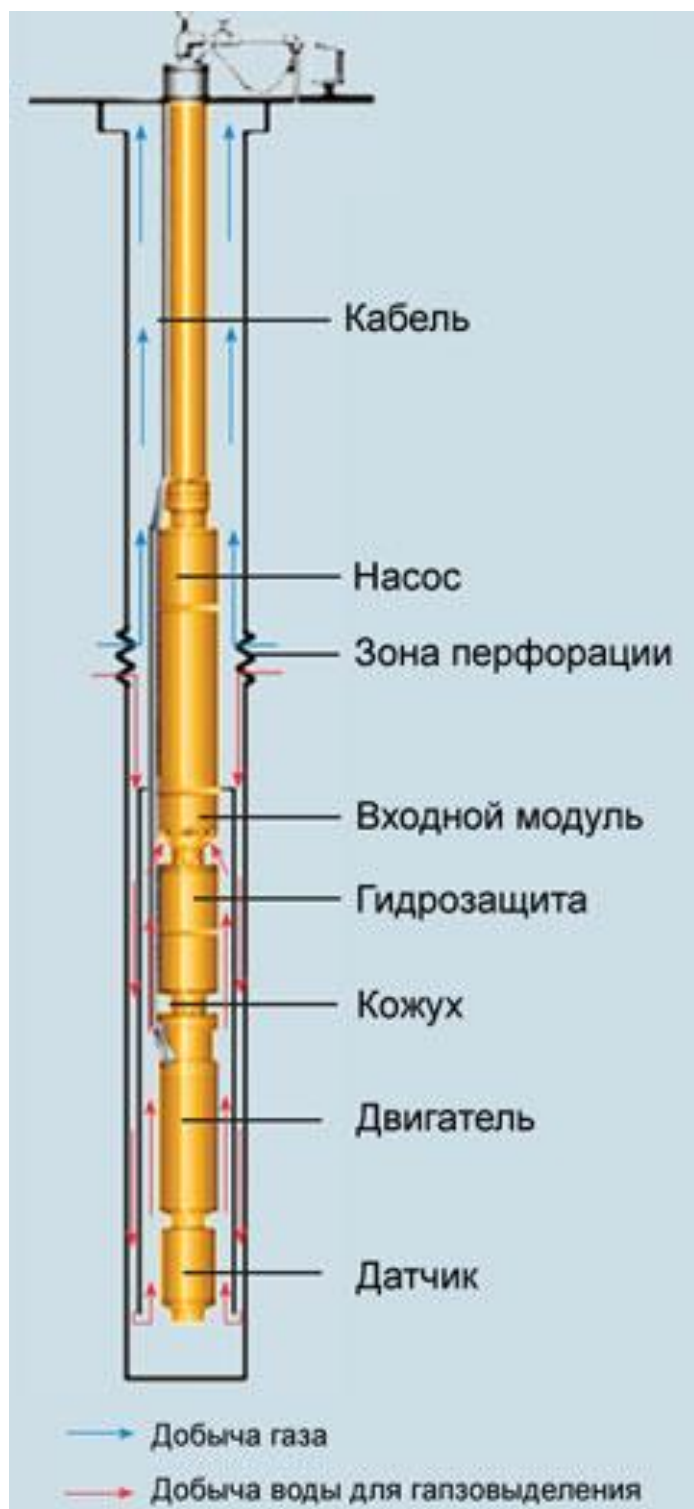


Рисунок2- Конфигурация УЭЦН для угольного метана

1. АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩИХ СХЕМ И КОНСТРУКЦИЙ

1.1 Краткая характеристика скважин

Глубина спуска насоса в пределах до 1100 метров.

Динамический уровень в основном колеблется в пределах от 70 до 800 метров.

1.2 Состав и комплектность установки электропривода центробежного насоса.

Установка УЭЦН состоит из погружного насосного агрегата (электродвигателя с гидрозащитой и насоса), кабельной линии (круглого плоского кабеля с муфтой кабельного ввода), колонны НКТ, оборудования устья скважины и наземного электрооборудования: трансформатора и станции управления (комплектного устройства) (см. рисунок 3.).

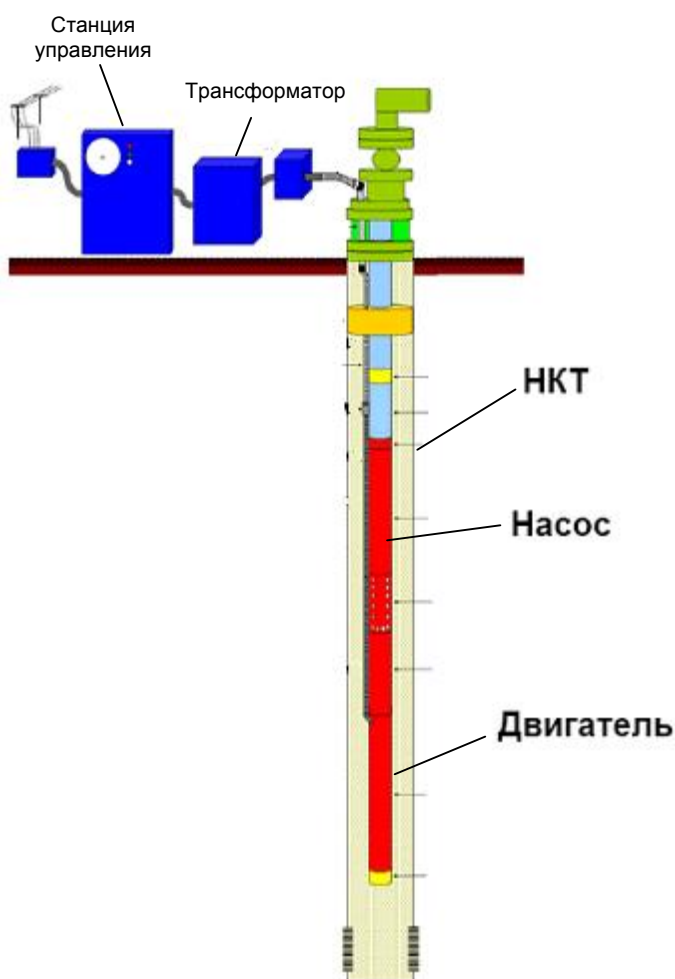


Рисунок 3 Установка электропривода центробежного насоса.

Трансформаторная подстанция преобразует напряжение промышленной сети до оптимальной величины на зажимах электродвигателя с учетом потерь напряжения в кабеле. Станция управления обеспечивает управление работой насосных агрегатов и его защиту при оптимальных режимах.

Погружной насосный агрегат, состоящий из насоса и электродвигателя с гидрозащитой и компенсатора, опускается в скважину по НКТ. Кабельная линия обеспечивает подвод электроэнергии к электродвигателю. Кабель крепится к НКТ, металлическими колесами. На длине насоса и протектора кабель плоский, прикреплен к ним металлическими колесами и защищен от повреждений кожухами и хомутами. Над секциями насоса устанавливаются обратный и сливной клапаны.

Оборудование устья скважины обеспечивает подвеску на фланце обсадной колонны НКТ с электронасосом и кабелем, герметизацию труб и кабеля, а также отвод добываемой жидкости в выходной трубопровод.

2. РАСЧЕТНАЯ ЧАСТЬ

2.1. Определение параметров погружного насоса

Основными характеристиками насоса являются:

- Расход;
- Напор (жидкости);

Подбор насоса осуществляется согласно с основным условием подъёма заданного количества жидкости (в зависимости от дебета скважины) на земную поверхность Н.

Для данной скважины соответствует погружной насос ЭЦНМ5-50-1300 со следующими параметрами:

- Производительность насоса - $50 \text{ м}^3 / \text{сут}$;
- Напор - 1300 м;
- Гидравлическая мощность насоса – 17 кВт;
- КПД насоса – 43%

2.2. Выбор двигателя

ПЭД подбирается под насос исходя из необходимой мощности. Мощность двигателя должна быть:

$$N_d \geq 1,05 N_g, \quad (3.2.1)$$

где N_d – мощность двигателя;

N_g – гидравлическая мощность насоса;

$$N_d = 1,05 \cdot 17 = 17.85 \text{ кВт}$$

По каталогу подбираем двигатель, соответствующий условию отраженному в формуле (3.1):

Двигатель ПЭДТН 22-103 В5

Мощность двигателя $N_d = 22 \text{ кВт}$.

2.3. Определение параметров схемы замещения асинхронного двигателя по каталожным данным

Для расчета электромеханических и механических характеристик асинхронного двигателя воспользуемся его математической моделью, которая в общем случае представляется различными схемами замещения. Наиболее простой и удобной для инженерных расчетов асинхронного двигателя является Т-образная схема замещения, рисунок 4.

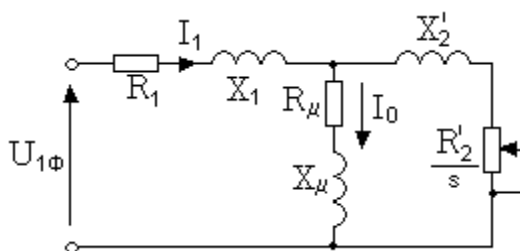


Рисунок 4 - Схема замещения асинхронного двигателя

Основные уравнения асинхронного двигателя, соответствующие принятой схеме замещения:

$$\overline{U_{1\phi}} - \overline{E_1} - j \cdot X_1 \cdot \overline{I_1} = 0;$$

$$\overline{E_1} + j \cdot X_2' \cdot \overline{I_2} + R_2' \cdot \overline{I_2} / s = 0;$$

$$\overline{I_1} + \overline{I_2} - \overline{I_0} = 0.$$

Векторная диаграмма токов, ЭДС и напряжений, удовлетворяющих системе основных уравнений асинхронного двигателя, изображена на рисунке 5.

$$k_{\max} = \frac{M_k}{M_H} = 2.2 \text{ о.е.}, \text{ - кратность максимального момента;}$$

$$k_{\min} = \frac{M_{\min}}{M_H} = 1.4 \text{ о.е.}, \text{ - кратность минимального момента;}$$

Эти данные позволяют определить параметры схемы замещения при следующих основных допущениях:

- магнитные и механические потери в двигателе составляют $0,02 P_H$;
- активные сопротивления статорной и роторной обмоток полагаются независимыми от режима работы двигателя, т.е. эффекты вытеснения не учитываются.

Ток холостого хода асинхронного двигателя можно найти из выражения:

$$\begin{aligned} I_0 &= \sqrt{\frac{I_{11}^2 - [p_* I_{1H} (1 - s_H) / (1 - p_* s_H)]^2}{1 - [p_* (1 - s_H) / (1 - p_* s_H)]^2}} = \\ &= \sqrt{\frac{19.533^2 - [0,75 \cdot 25.749 \cdot (1 - 0.058) / (1 - 0,75 \cdot 0.058)]^2}{1 - [0,75 \cdot (1 - 0.058) / (1 - 0,75 \cdot 0.058)]^2}} = 6.601 \text{ A}, \end{aligned} \quad (3.3.1)$$

где I_{1H} - номинальный ток статора двигателя;

$$I_{1H} = \frac{P_H}{3 \cdot U_{1H} \cdot \cos \varphi_H \cdot \eta_H} = \frac{22000}{3 \cdot 400 \cdot 0,879 \cdot 0,81} = 25.749 \text{ A}; \quad (3.3.2)$$

I_{11} - ток статора двигателя при частичной нагрузке;

$$I_{11} = \frac{p_* \cdot P_H}{3 \cdot U_{1H} \cdot \cos \varphi_{p_*} \cdot \eta_{p_*}} = \frac{0,75 \cdot 22000}{3 \cdot 400 \cdot 0,869 \cdot 0,81} = 19.533 \text{ A}; \quad (3.3.3)$$

$\cos \varphi_{p_*}$ - коэффициент мощности при частичной нагрузке;

η_{p_*} - КПД при частичной нагрузке;

$p_* = P/P_H$ - коэффициент загрузки двигателя.

Коэффициент мощности и КПД при частичной нагрузке в технической литературе приводятся редко, а для целого ряда серий электрических машин

такие данные в справочной литературе отсутствуют. Эти параметры можно определить, руководствуясь следующими соображениями:

- современные асинхронные двигатели проектируются таким образом, что наибольший КПД достигается при загрузке на 10-15% меньшей номинальной [1]. Двигатели рассчитываются так потому, что большинство из них в силу стандартной дискретной шкалы мощностей работают с некоторой недогрузкой. Поэтому КПД при номинальной нагрузке и нагрузке $p_* = 0,75$ практически равны между собой, т.е. $\eta_H \approx \eta_{0,75} = 81\%$

- коэффициент мощности при той же нагрузке $p_* = 0,75$ значительно отличается от коэффициента мощности при номинальной нагрузке, причем это отличие в значительной степени зависит от мощности двигателя и для известных серий асинхронных двигателей с достаточной для практики точностью подчиняется зависимости, приведенной на рисунке 6.

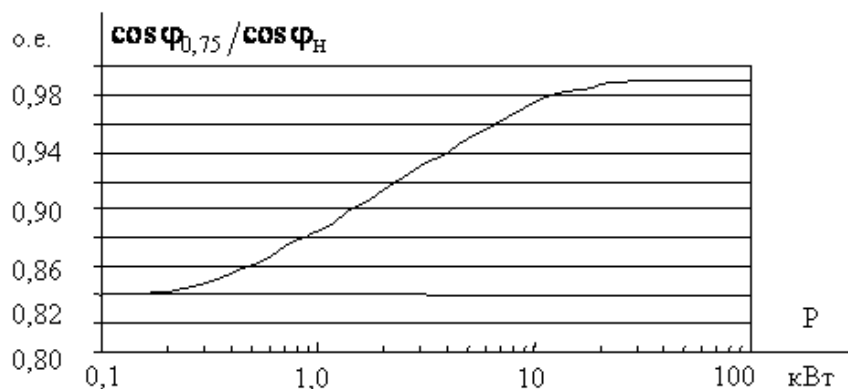


Рисунок 6 - Зависимость $\cos \varphi_{0,75} / \cos \varphi_H$ от мощности асинхронного двигателя

Согласно зависимости, приведенной на рисунке 1.3, для мощности двигателя $P = 22000$ Вт отношение $\cos \varphi_{0,75} / \cos \varphi_H = 0,98$, следовательно, коэффициент мощности при частичной нагрузке составит $\cos \varphi_{p*} = 0,98 \cdot \cos \varphi_H = 0,869$. (3.3.4)

Из формулы Клосса определим соотношение для расчета критического скольжения

$$s_k = s_H \frac{k_{MAX} + \sqrt{(k_{MAX})^2 - [1 - 2 \cdot s_H \cdot \beta (k_{MAX} - 1)]}}{1 - 2 \cdot s_H \cdot \beta (k_{MAX} - 1)} =$$

$$= 0,058 \cdot \frac{2,2 + \sqrt{2,2^2 - [1 - 2 \cdot 0,058 \cdot 1 \cdot (2,2 - 1)]}}{1 - 2 \cdot 0,058 \cdot 1 \cdot (2,2 - 1)} = 0,283 \quad (3.3.5)$$

где

$$C_1 = 1 + (I_0 / (2 \cdot k_i \cdot I_{1H})) = 1 + (6.601 / (2 \cdot 6 \cdot 25.749)) = 1.021. \quad (3.3.6)$$

Значение коэффициента β находится в диапазоне 0,6 – 2,5, поэтому в первом приближении принимаем $\beta = 1$.

Определим коэффициент A_1

$$A_1 = m U_{1\Phi}^2 (1 - s_H) / (2 \cdot C_1 \cdot k_{MAX} \cdot P_H) =$$

$$= 3 \cdot 400^2 \cdot (1 - 0,058) / (2 \cdot 1.021 \cdot 2,2 \cdot 22000) = 4.573. \quad (3.3.7)$$

Тогда активное сопротивление ротора, приведенное к обмотке статора асинхронного двигателя

$$R_2' = A_1 / (\beta + 1/s_k) C_1 = 4.573 / (1 + 1/0.283) \cdot 1.021 = 0.987 \text{ Ом}, \quad (3.3.8)$$

Активное сопротивление статорной обмотки можно определить по следующему выражению

$$R_1 = C_1 R_2' \beta = 1.021 \cdot 0.987 \cdot 1 = 1.008 \text{ Ом}. \quad (3.3.9)$$

Определим параметр γ , который позволяет найти индуктивное сопротивление короткого замыкания X_{KH} :

$$\gamma = \sqrt{(1/s_k^2) - \beta^2} = \sqrt{(1/0.283^2) - 1} = 3.394, \quad (3.3.10)$$

тогда

$$X_{KH} = \gamma C_1 R_2' = 3.394 \cdot 1.021 \cdot 0.987 = 3.42 \text{ Ом}. \quad (3.3.11)$$

Для того, чтобы выделить из индуктивного сопротивления $X_{\text{кн}}$ сопротивления рассеяния фаз статора и ротора, воспользуемся соотношениями, которые справедливы для серийных асинхронных двигателей.

Индуктивное сопротивление рассеяния роторной обмотки, приведенное к статорной, рассчитаем по следующему выражению

$$X'_{2\text{н}} = 0,58X_{\text{кн}} / C_1 = 0,58 \cdot 3.42 / 1.021 = 1.942 \text{ Ом.} \quad (3.3.12)$$

Индуктивное сопротивление статорной обмотки определим по следующему выражению

$$X_{1\text{н}} = 0,42X_{\text{кн}} = 0,42 \cdot 3.42 = 1.436 \text{ Ом.} \quad (3.3.13)$$

По найденным значениям C_1 , R'_2 , R_1 и X_K определим критическое скольжение

$$s_{\text{к}} = \frac{C_1 R'_2}{\pm \sqrt{R_1^2 + X_{\text{кн}}^2}} = \frac{1.021 \cdot 0.987}{\pm \sqrt{1.008^2 + 3.42^2}} = \pm 0.283. \quad (3.3.14)$$

Данное значение критического скольжения совпадает со значением, посчитанным ранее с абсолютной погрешностью δ меньше 0,0001.

Согласно векторной диаграмме (рисунок 1.2) э.д.с. ветви намагничивания E_1 , наведенная потоком воздушного зазора в обмотке статора в номинальном режиме, равна

$$(3.3.15)$$

$$\begin{aligned} E_1 &= \sqrt{(U_{1j} \cos \varphi_{1\text{н}} - R_1 I_{1\text{н}})^2 + (U_{1j} \sin \varphi_{1\text{н}} + X_1 I_{1\text{н}})^2} = \\ &= \sqrt{(400 \cdot 0,879 - 1.008 \cdot 25.749)^2 + (400 \cdot \sin(0.497) + 1.436 \cdot 25.749)^2} = 397.37 \text{ В,} \end{aligned}$$

тогда индуктивное сопротивление намагничивания

$$X_{\mu\text{н}} = E_1 / I_0 = 397.37 / 6.601 = 60.203 \text{ Ом.} \quad (3.3.16)$$

Используя параметры схемы замещения можно произвести расчет механических и электромеханических характеристик.

2.4. Расчет и построение электромеханических характеристик

Электромеханическая характеристика, определяющая зависимость приведенного тока ротора от скольжения s

$$I_2'(\omega) = \frac{U_{1j}}{\pm \sqrt{\left(R_1 + \frac{R_2'}{\omega_0 - \omega} \right)^2 + (X_{1h} + X_{2h}')}} = \frac{400}{\pm \sqrt{(1.008 + 0.987 / \frac{\omega_0 - \omega}{\omega_0})^2 + (1.436 + 1.942)}} \quad (3.4.1)$$

где

$U_{1j} = 400\text{В}$ - фазное напряжение обмоток статора асинхронного двигателя;

$$\omega_0 = \frac{2 \cdot \pi \cdot 50}{p} = 314 \text{ рад/с} \quad (3.4.2)$$

Для короткозамкнутого асинхронного двигателя представляет интерес электромеханическая характеристика $I_1 = f(\omega)$, отражающая зависимость тока статора I_1 от скорости ω (скольжения s). Ток статора I_1 определяется путем сложения вектора тока намагничивания \bar{I}_0 и вектора тока ротора \bar{I}_2' (рисунок 1.2). Обычно это производится с помощью круговой диаграммы.

Полагая ток намагничивания асинхронного двигателя I_0 реактивным ($I_{0A} = 0$), ток статора I_1 через приведенный ток ротора I_2' можно найти по формуле

$$\begin{aligned}
 I_1 &= \sqrt{I_0^2 + I_2'(\omega)^2 + 2 \cdot I_0 \cdot I_2'(\omega)^2 \cdot 0.673} = \\
 &= \sqrt{6.601^2 + I_2'(\omega)^2 + 2 \cdot 6.601 \cdot I_2'(\omega)^2 \cdot 0.673}
 \end{aligned}
 \tag{3.4.3}$$

Вид электромеханических характеристик представлен на рисунке 7.

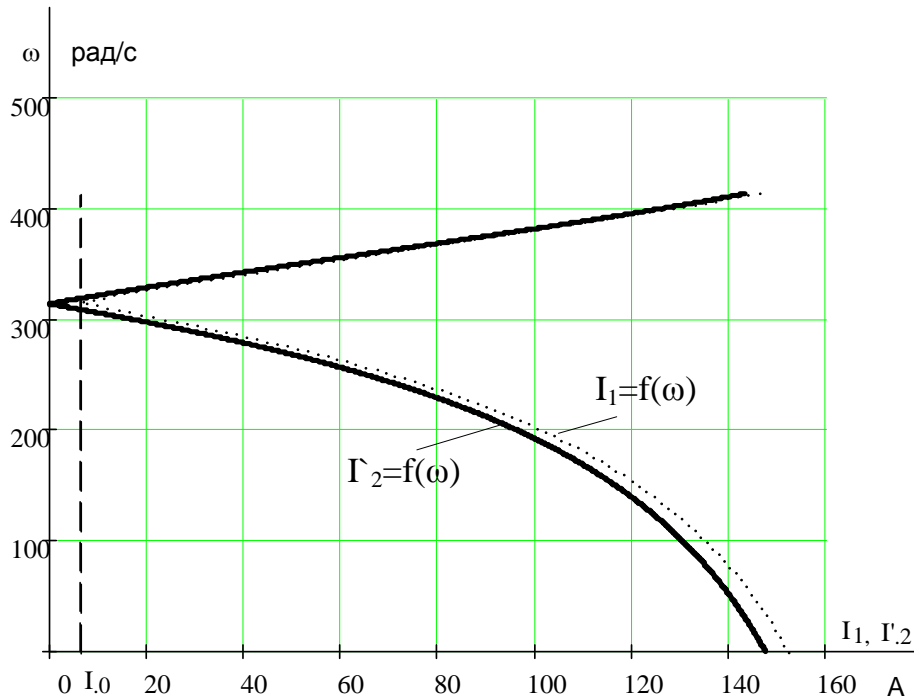


Рисунок 7. - Электромеханическая характеристика $I_1 = f(\omega)$, $I_2' = f(\omega)$ асинхронного двигателя

2.5. Расчет и построение механической характеристики

Механическая характеристика асинхронного двигателя при переменных значениях величины и частоты напряжения питания определяется следующим выражением

$$\begin{aligned}
 M &= \frac{3 \cdot U_{1j}^2 \cdot R_2'}{\omega_0 \frac{\omega_0 - \omega}{\omega_0} \cdot \left[\left(R_1 + \frac{R_2'}{\frac{\omega_0 - \omega}{\omega_0}} \right)^2 + X_{кн}^2 \right]} = \\
 &= \frac{3 \cdot 400^2 \cdot 0.987}{314 \cdot \frac{314 - \omega}{314} \cdot \left[\left(1.008 + \frac{0.987}{\frac{314 - \omega}{314}} \right)^2 + 3.42^2 \right]} .
 \end{aligned} \tag{3.5.1}$$

Расчетная характеристика:

Момент номинальный:

$$M_{ном} = \frac{P_{ном}}{\omega_0(1 - S_H)} = \frac{22000}{314 \cdot (1 - 0,058)} = 74,38 \text{ Нм} \tag{3.5.2}$$

$$\text{Момент минимальный: } M_{мин} = M_{ном} \cdot k_{мин} = 74,38 \cdot 1,4 = 104,13 \text{ Нм} \tag{3.5.3}$$

$$\text{Момент критический: } M_{кр} = M_{ном} \cdot k_{мах} = 74,38 \cdot 2,2 = 163,63 \text{ Нм} \tag{3.5.4}$$

$$\text{Момент пусковой: } M_{пуск} = M_{ном} \cdot M_{пуск}^* = 74,38 \cdot 1,8 = 133,88 \text{ Нм} \tag{3.5.5}$$

Вид механической характеристики приведен на рисунке 8.

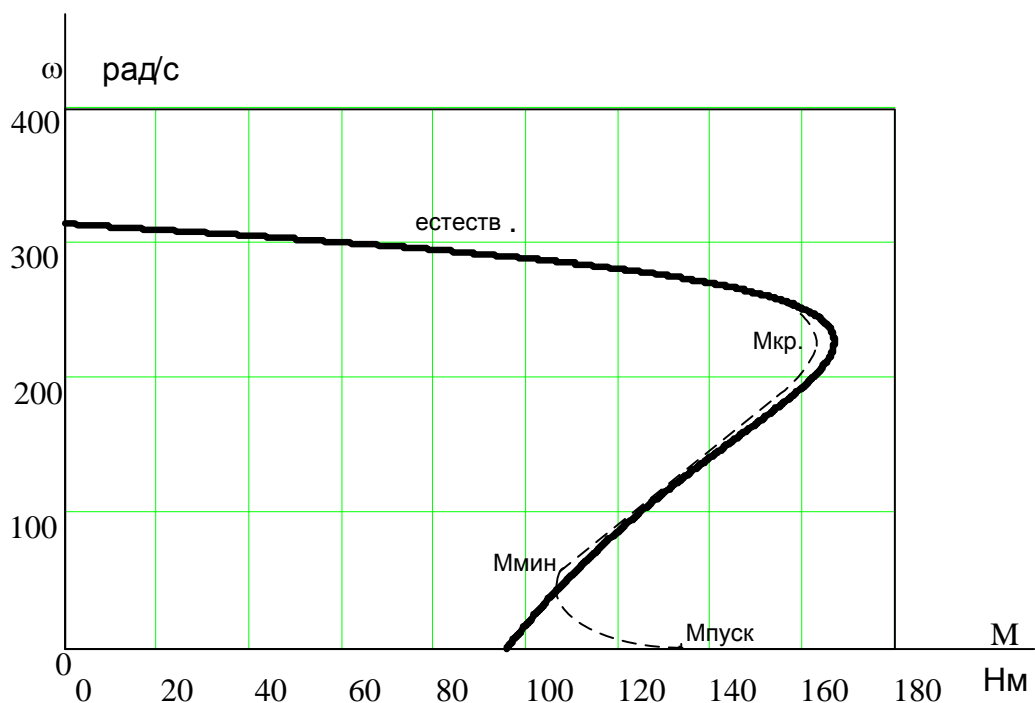


Рисунок 8 – Механическая характеристика $M = f(\omega)$ асинхронного двигателя.

Данными методами можно построить электромеханическую характеристику, но механическая характеристика получается не точной, так как не учитываются многие факторы и приняты допущения магнитные и механические потери в двигателе составляют $0,02 P_n$, активные сопротивления статорной и роторной обмоток полагаются независимыми от режима работы двигателя, т.е. эффекты вытеснения не учитываются, оказывающие влияние на характеристику АД.

Расхождения в расчетных данных с паспортными, построенных по ним графиков вызвано тем, что паспортные данные приведены для двигателя с насыщенной магнитной системой, а мы не учитывали насыщение двигателя. Этим и вызвано различие полученных графиков и расчетных данных с паспортными.

2.6 ВЫБОР ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ЧАСТОТЫ

Итак на настоящий момент единственным устройством, позволяющим регулировать частоту вращения асинхронного двигателя является преобразователь частоты.

ПЧ применяют для регулирования частоты вращения электродвигателей переменного тока, приводящих во вращение различные рабочие механизмы (насосы, вентиляторы, компрессоры и др.). Регулирование частоты электродвигателя ЭЦН позволяет регулировать и производительность самого насоса. Причём регулирование это происходит очень плавно, т. к. современные ПЧ позволяют регулировать частоту с дискретностью 0,1 Гц.

Кроме регулирования частоты применение ПЧ позволяет:

- Осуществлять плавный разгон и останов практически без превышения номинального тока при разгоне.
- Иметь $\cos\varphi=1$ на входе практически, что немаловажно для сохранения чистоты сети.
- Осуществлять быстродействующие максимальные защиты (Например, по максимальному току).

2.6.1. Особенности применения ПЧ в системе «ПЧ – трансформатор - погружной двигатель»

При работе преобразователя частоты в системе «ПЧ - повышающий трансформатор - погружной электродвигатель» возникает ряд проблем:

1. Влияние на входной трансформатор.

Как известно, следствием работы преобразователя частоты является повышение потерь в стали и обмотках, а, следовательно, и повышенный нагрев трансформатора. Кроме того, возникает дополнительный шум в работе трансформатора.

2. Влияние на выходной трансформатор.

Выходной трансформатор также подвержен влиянию работы преобразователя частоты. В трансформаторе увеличиваются потери в стали и возникает шум при его работе. В кабелях, которые соединяют выход преобразователя с повышающим трансформатором, к тому же увеличивается вероятность пробоя изоляции из-за повышения скорости нарастания напряжения в импульсах, формируемых инвертором.

Существуют способы снижения негативного влияния ПЧ на УЭЦН

- Применение ПЧ с высокой частотой ШИМ позволяет улучшить синусоидальность выходного напряжения, что приводит к:

- Применение LC-фильтров также улучшает форму синусоиды и значительно снижает величину пиков напряжения, что означает:

- Уменьшение нагрева трансформатора, кабеля и двигателя
- Замедляет старение изоляции
- Повышению момента и к.п.д. двигателя

При выборе преобразователя частоты необходимо учесть ряд особенностей, обусловленных физическими параметрами.

Параметры двигателя и скважины.

При выборе станции управления необходимо руководствоваться параметрами двигателя и скважины. Мощность преобразователя частоты и всей остальной силовой аппаратуры зависит от мощности двигателя и от глубины его расположения в скважине. Обычно для номинальной работы преобразователь частоты выбирают на типоразмер выше, чем мощность двигателя. Если преобразователь частоты поставить на двигатель большей мощности, чем сам преобразователь, то нет никакой гарантии, что привод запустится, и будет работать. У каждого преобразователя частоты есть свои внутренние защиты, которые не позволяют приводу за пределами критических параметров (выходной ток не должен превышать допустимого значения). Преобразователь частоты может запустить двигатель, но он будет работать неустойчиво, что может привести к выходу его из строя.

Выбираем преобразователь ЭЛЕКТОН 05.ПЧ-ТППТ-63-50-1 УХЛ1

Станция управления "Электон-05" предназначена для регулирования частоты вращения, оптимизации работы и защиты серийно выпускаемых электродвигателей. Область применения - погружные асинхронные или вентильные электродвигатели для добычи нефти, асинхронные электродвигатели общепромышленного исполнения, применяемые для водозаборов и водоснабжения, приводов винтовых насосов, для дымососов и промвентиляции.

Особенности управления серии ЭЛЕКТОН 05

- входные цепи выполнены на более высокое напряжение для повышения устойчивости при кратковременных перенапряжениях;
- стабилизация выходного напряжения при эксплуатации от нестабильной питающей сети;
- встроенный фильтр предназначен для уменьшения коэффициента несинусоидальности напряжения на входе СУ;
- собственный или встроенный счетчик для учета потребляемой активной и реактивной электроэнергии;
- USB-порт для съема информации на стандартный USB Flash накопитель;
- LAN-порт для подключения в сеть Ethernet по протоколу Modbus TCP;
- конструкция отличается повышенной ремонтопригодностью.

Имеется возможность запуска насосной установки по задаваемой программе, в ручном и в автоматическом режиме, а также возможность поддержания технологического параметра (частоты, тока, давления) с помощью встроенного ПИД-регулятора.

2.6.2. Дополнительные возможности станции управления с преобразователем частоты

Кроме всех вышеперечисленных плюсов СУ с ПЧ хотелось бы отметить некоторые уникальные возможности, вносимые в СУ ПЧ:

- Плавный пуск останов

Кроме изменения частоты вращения электродвигателя, преобразователь частоты может плавно разгонять двигатель до номинального режима работы и плавно его останавливать. Плавный пуск и торможения исключают биения механизма, а значит, уменьшают механический и электрический износ оборудования.

- Пуск ЭЦН при турбинном вращении (см. рисунок 9.)

Общеизвестно, что при остановке насоса вода начинает стекать, возникает турбинное вращение, т. е. разворот двигателя в противоположенном направлении. Повторный запуск в случае турбинного вращения возможен только по его окончании. На опыте нашей эксплуатации это время составляет от 20 до 60 мин. Используя станцию управления с преобразователем частоты можно запустить двигатель в любой момент, игнорируя турбинное вращение.

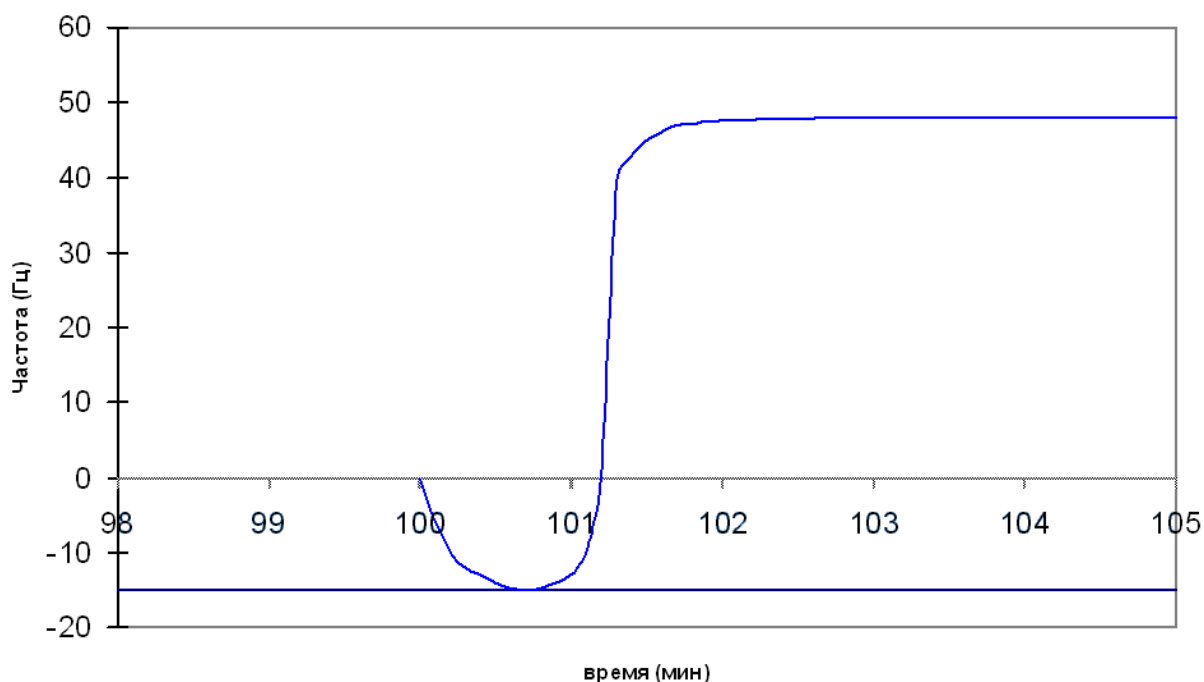


Рисунок 9. График торможения и разгона при турбинном вращении.

Методика пуска довольно проста:

При пуске ПЧ начинает «поиск» частоты вращения в другую сторону. Найдя эту частоту, он плавно подхватывает двигатель, затем плавно тормозит и запускает в другую сторону и выходит на рабочую частоту. Эта особенность позволяет экономить время и более полно использовать ресурс оборудования.

➤ Возможности расклинивания двигателя путём раскачки.

При заклинивании насоса происходит срабатывание защиты от заклинивания вала (Защита от перегрузки).

Если запустить двигатель после этого не удаётся в нормальном режиме, то единственное, что остаётся это снять защиту от перегрузки и попытаться запустить двигатель путём подачи на него прямого напряжения и, как следствие ничем неконтролируемого тока. Надо ли говорить, что при данном способе расклинивания и двигатель и насос и всё электрооборудование испытывают «шоковые» перегрузки.

При использовании ПЧ в данном случае возможно применение методики «раскачки» ПЧ подаёт повышенное напряжение пониженной частоты в одном, а затем в другом направлении, как бы раскачивая двигатель. При этом момент на валу двигателя может быть выше номинального, а ток, тем не менее, не превышать номинального. Такая возможность присуща только СУ с ПЧ. Применение аналогичных методик, с использованием реверсивного контактора, когда полное напряжение подаётся то в одну, то в другую сторону влечёт за собой повышенные механические нагрузки на насос и повышенные нагрузки на электрооборудование.

2.7. Математическое описание обобщенной асинхронной машины

Обобщенная асинхронная машина показана на рисунке 10. Она содержит трехфазную обмотку на статоре и трехфазную обмотку на роторе. Обмотки статора и ротора подключены к симметричным трехфазным источникам

напряжения. Математическое описание такой машины базируется на известных законах.

Уравнения равновесия ЭДС на обмотках статора и ротора базируется на **втором законе Кирхгофа**.

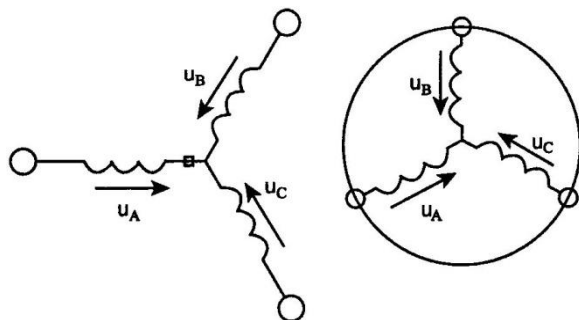


Рисунок 10 – Обобщённая асинхронная машина.

Для статора

Для ротора

$$\left\{ \begin{array}{l} u_A = R_A \cdot i_A + \frac{d\psi_A}{dt} \\ u_B = R_B \cdot i_B + \frac{d\psi_B}{dt} \\ u_C = R_C \cdot i_C + \frac{d\psi_C}{dt} \end{array} \right. \quad \left\{ \begin{array}{l} u_a = R_a \cdot i_a + \frac{d\psi_a}{dt} \\ u_b = R_b \cdot i_b + \frac{d\psi_b}{dt} \\ u_c = R_c \cdot i_c + \frac{d\psi_c}{dt} \end{array} \right. \quad (3.6.1)$$

В уравнениях (3.6.1) фигурируют мгновенные напряжения, токи потокоцепления статора и ротора, а также активные сопротивления обмоток. Обычно обмотки выполняются симметричными, поэтому $R_A = R_B = R_C = R_s$ – активное сопротивление статорной обмотки, $R_a = R_b = R_c = R_r$ – активное сопротивление роторной обмотки.

Вторым используемым законом является **закон Ампера**, который связывает потокоцепления обмоток с токами, протекающим по обмоткам:

Для статора

$$\left. \begin{aligned} \psi_A &= L_{AA} \cdot i_A + L_{AB} \cdot i_B + L_{AC} \cdot i_C + L_{Aa} \cdot i_a + L_{Ab} \cdot i_b + L_{Ac} \cdot i_c \\ \psi_B &= L_{BA} \cdot i_A + L_{BB} \cdot i_B + L_{BC} \cdot i_C + L_{Ba} \cdot i_a + L_{Bb} \cdot i_b + L_{Bc} \cdot i_c \\ \psi_C &= L_{CA} \cdot i_A + L_{CB} \cdot i_B + L_{CC} \cdot i_C + L_{Ca} \cdot i_a + L_{Cb} \cdot i_b + L_{Cc} \cdot i_c \end{aligned} \right\} \quad (3.6.2a)$$

Для ротора

$$\left. \begin{aligned} \psi_a &= L_{aA} \cdot i_A + L_{aB} \cdot i_B + L_{aC} \cdot i_C + L_{aa} \cdot i_a + L_{ab} \cdot i_b + L_{ac} \cdot i_c \\ \psi_B &= L_{bA} \cdot i_A + L_{bB} \cdot i_B + L_{bC} \cdot i_C + L_{ba} \cdot i_a + L_{bb} \cdot i_b + L_{bc} \cdot i_c \\ \psi_c &= L_{cA} \cdot i_A + L_{cB} \cdot i_B + L_{cC} \cdot i_C + L_{ca} \cdot i_a + L_{cb} \cdot i_b + L_{cc} \cdot i_c \end{aligned} \right\} \quad (3.6.2б)$$

Симметричные уравнения для определения потокоцеплений показывают, что потокоцепление каждой обмотки зависит от токов во всех обмотках; эти зависимости проявляются через взаимоиндукцию.

В уравнениях (3.6.2) $L_{AA}, L_{BB}, L_{CC}, L_{aa}, L_{bb}, L_{cc}$ являются собственными индуктивностями соответствующих обмоток все остальные – взаимоиндуктивностями между соответствующими обмотками.

Третьим законом, лежащим в основе анализа, является второй **закон Ньютона** – закон равновесия моментов на валу машины:

$$J_{\Sigma} \cdot \frac{d\vec{\omega}_m}{dt} = \vec{M} - \vec{M}_n \quad (3.6.3)$$

Где

- J (кг·м²) – момент инерции на валу машины, учитывающий инерционность как самой машины, так и приведенной к валу инерционности рабочего механизма и редуктора

- $\vec{\omega}_m \left(\frac{1}{rad} \right)$ – угловая скорость вала машины

- \vec{M}_n (Н·м) – момент рабочего механизма, приведенный к валу, в общем случае он может быть функцией скорости и угла поворота.

Наконец, четвертым и последним законом, лежащим в основе анализа машины, является закон, сформулированный **Ленцем**, как **правило левой**

руки. Этот закон связывает векторные величины момента, потокосцепления и тока:

$$\vec{M} = k \cdot (\vec{\psi} \times \vec{i}) \quad (3.6.4)$$

Перечислим основные серьёзные трудности при исследовании машины:

1. в уравнениях (3.6.3 и 3.6.4) фигурируют векторные величины, а в уравнениях (3.6.1 и 3.6.2) скалярные
2. количество взаимосвязанных уравнений равно 16, а количество коэффициентов – 44
3. коэффициенты взаимоиנדукции между обмотками статора и ротора в уравнениях (3.6.2) являются функцией угла поворота ротора относительно статора, то есть уравнения (3.6.2) являются уравнениями с переменными коэффициентами
4. уравнение (3.6.4) является нелинейным, так как в нем перемножаются переменные.

На пути упрощения математического описания асинхронной машины, да и вообще всех машин переменного тока, удачным и изящным оказался **метод пространственного вектора**, который позволил существенно упростить и сократить вышеприведенную систему уравнений. Метод позволяет связать уравнения (3.6.1 – 3.6.4) в единую систему с векторными переменными состояния. Суть метода состоит в том, что мгновенные значения симметричных трехфазных переменных состояния (напряжения, токи, потокосцепления) можно математически преобразовать так, чтобы они были представлены одним пространственным вектором. Это математическое преобразование имеет вид (например, для тока статора) :

$$\vec{i} = \frac{2}{3} \cdot (i_A + \vec{a} \cdot i_B + \vec{a}^2 \cdot i_C) \quad (3.6.5)$$

Где $\vec{a} = e^{j\frac{2\pi}{3}}$, $\vec{a}^2 = e^{j\frac{4\pi}{3}}$ – векторы, учитывающие пространственное смещение обмоток.

$$i_A = I_m \cdot \cos(\omega \cdot t), i_B = I_m \cdot \cos\left(\omega \cdot t - \frac{2\pi}{3}\right), i_C = I_m \cdot \cos\left(\omega \cdot t + \frac{2\pi}{3}\right) \quad -$$

трехфазная симметричная система токов статора. Подставив в уравнения (3.6.5) значение мгновенных токов, найдем математическое описание пространственного вектора статорного тока:

$$\vec{i}_s = \frac{2}{3} \cdot \left(\cos \omega t + e^{j\frac{2\pi}{3}} \cdot \cos\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) + e^{j\frac{4\pi}{3}} \cdot \cos\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right) \right) = I_m \cdot e^{j\omega t} \quad (3.6.6)$$

На рисунке 11 представлена геометрическая интерпретация пространственного вектора тока — это вектор на комплексной плоскости с модулем (длиной) I_m , вращающийся с угловой скоростью ω в положительном направлении. Проекции вектора \vec{i}_s на фазные оси A, B, C определяют мгновенные токи в фазах. Аналогично пространственными векторами можно представить все напряжения, токи и потокосцепления, входящие в уравнения (1), (2).

Теперь можно переходить к упрощению уравнений.

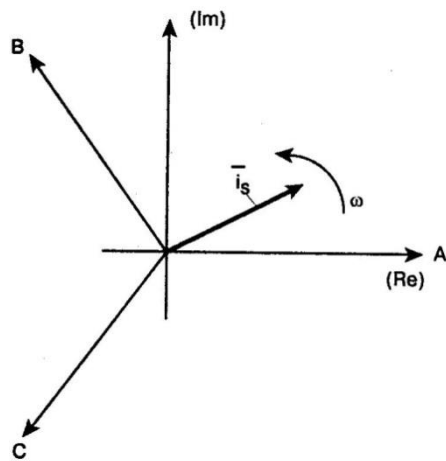


Рисунок 11 – Пространственный вектор тока.

Шаг первый. Для преобразования уравнений (3.6.1) в мгновенных значениях к уравнениям в пространственных векторах умножим их на

выражения: первые уравнения на $\frac{2}{3}$, вторые на $\frac{2}{3} \cdot \bar{a}$, третьи на $\frac{2}{3} \cdot \bar{a}^2$, – и

сложим отдельно для статора и ротора. Тогда получим:

$$\begin{cases} \vec{u}_s = R_s \cdot \vec{i}_s + \frac{d\vec{\psi}_s}{dt} \\ \vec{u}_r = R_r \cdot \vec{i}_r + \frac{d\vec{\psi}_r}{dt} \\ \vec{\psi}_s = L_s \cdot \vec{i}_s + L_m(\Theta) \cdot \vec{i}_r \\ \vec{\psi}_r = L_r \cdot \vec{i}_r + L_m(\Theta) \cdot \vec{i}_s \end{cases} \quad (3.6.7)$$

где L_s, L_r – собственные индуктивности статора и ротора

$L_m(\Theta)$ – взаимная индуктивность между статором и ротором.

Таким образом, вместо двенадцати уравнений (3.6.1) – (3.6.2) получено лишь четыре уравнения (3.6.7).

Шаг второй. Переменные коэффициенты взаимной индукции в уравнениях для потокосцеплений (3.6.7) являются результатом того, что уравнения равновесия ЭДС для статора записаны в неподвижной системе координат, связанной со статором, а уравнения равновесия ЭДС для ротора записаны во вращающейся системе координат, связанной с ротором. Метод пространственного вектора позволяет записать эти уравнения в единой системе координат, вращающейся с произвольной скоростью ω_k . В этом случае уравнения (3.32) преобразуются к виду:

$$\begin{cases} \vec{u}_s = R_s \cdot \vec{i}_s + \frac{d\vec{\psi}_s}{dt} + j\omega_k \vec{\psi}_s \\ \vec{u}_r = R_r \cdot \vec{i}_r + \frac{d\vec{\psi}_r}{dt} + j(\omega_k - \omega) \cdot \vec{\psi}_r \\ \vec{\psi}_s = L_s \cdot \vec{i}_s + L_m(\Theta) \cdot \vec{i}_r \\ \vec{\psi}_r = L_r \cdot \vec{i}_r + L_m(\Theta) \cdot \vec{i}_s \end{cases} \quad (3.6.8)$$

где $\omega = z_p \cdot \omega_m$, z_p – число пар полюсов в машине.

В уравнениях (3.6.8) все коэффициенты являются величинами постоянными, имеют четкий физический смысл и могут быть определены по паспортным данным двигателя, либо экспериментально .

Шаг третий. Этот шаг связан с определением момента. Момент в уравнении (3.6.4) является векторным произведением любой пары векторов. Из уравнения (3.6.8) следует, что таких пар может быть шесть $(\vec{i}_s, \vec{i}_r); (\vec{\psi}_s, \vec{\psi}_r); (\vec{i}_s, \vec{\psi}_s); (\vec{i}_s, \vec{\psi}_r); (\vec{i}_r, \vec{\psi}_r); (\vec{i}_r, \vec{\psi}_s)$. Часто в рассмотрение вводится потокосцепление взаимной индукции $\vec{\psi}_m = L_m \cdot (\vec{i}_s + \vec{i}_r)$. В этом случае появляется ещё четыре возможности представления электромагнитного момента машины через следующие пары: $(\vec{i}_s, \vec{\psi}_m); (\vec{i}_r, \vec{\psi}_m); (\vec{i}_r, \vec{\psi}_m); (\vec{\psi}_r, \vec{\psi}_m)$ после выбора той или иной пары уравнение момента приобретает определенность, а количество уравнений в системе (3.6.8) сокращается до двух. Кроме того, в уравнениях (3.6.3) и (3.6.4) векторные величины момента и скорости могут быть заменены их модульными значениями. Это является следствием того, что пространственные векторы токов и потокосцеплений расположены в плоскости, перпендикулярной оси вращения, а векторы момента и угловой скорости совпадают с осью. В качестве примера покажем запись уравнений момента через некоторые пары переменных состояния машины.

$$\begin{cases} M = \frac{3}{2} \cdot p \cdot L_m \cdot \text{Mod}(\vec{i}_s \times \vec{i}_r) \\ M = \frac{3}{2} \cdot p \cdot L_m \cdot \text{Mod}(\vec{\psi}_s \times \vec{i}_s) \\ M = \frac{3}{2} \cdot p \cdot L_m \cdot \text{Mod}(\vec{\psi}_r \times \vec{i}_s) \end{cases} \quad (3.6.9)$$

3 Имитационное моделирование

3.1. Математическое описание погружного асинхронного двигателя

Все параметры и переменные состояния электропривода представляются в относительных единицах. Использование относительных единиц при моделировании режимов работы электрических машин источников их питания характеризуется наглядностью и определённым удобством при моделировании.

Общая формула перехода к относительным единицам имеет вид:

$$y = \frac{Y}{Y_b} \quad (3.7.1)$$

где Y – значение физической величины (параметра, воздействия, переменной

состояния и др.) в *исходной* системе единиц, например в единицах СИ;

Y_b – *базисное* значение, выраженное в той же исходной системе, принятое в качестве единицы измерения величины Y в системе относительных единиц;

y – значение величины в системе *относительных* единиц.

В качестве основных базовых величин выбираются амплитудные номинальные значения фазного напряжения и тока, а также номинальное значение угловой частоты:

$$U_b = \sqrt{2} \cdot U_1, I_b = \sqrt{2} \cdot I_1, \omega_b = \omega = 2 \cdot \pi \cdot f_1 \quad (3.7.2)$$

на этой основе определяются базовые значения всех переменных и коэффициентов, входящих в уравнения, а также базового времени:

$$R_b = \frac{U_b}{I_b}, L_b = \frac{U_b}{\omega_b \cdot I_b}, \psi_b = \frac{U_b}{\omega_b}, M_b = \frac{3}{2} z_p \frac{U_b \cdot I_b}{\omega_b}, t_b = \frac{1}{\omega_b} \quad (3.7.2)$$

В дальнейшем используются уравнения только в относительных величинах. Обобщенная система уравнений для описания асинхронной машины принимает вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} \overline{u_s} = r_s \cdot \overline{i_s} + \frac{d\overline{\psi_s}}{dt} + j \cdot \alpha_k \cdot \overline{\psi_s} \\ \overline{u_r} = r_r \cdot \overline{i_r} + \frac{d\overline{\psi_r}}{dt} + j \cdot (\alpha_k - \nu) \cdot \overline{\psi_r} \\ \overline{\psi_s} = x_s \cdot \overline{i_s} + x_m \cdot \overline{i_r} \\ \overline{\psi_r} = x_r \cdot \overline{i_r} + x_m \cdot \overline{i_s} \\ m = k \cdot \text{Mod}(\overline{\psi_i} \times \overline{i_k}) \\ T_m \frac{d\nu}{dt} = m - m_n \end{array} \right. \quad (3.7.3)$$

В этих уравнениях все переменные относительные, полученные как результат деления реальных значений на базовые, все коэффициенты также безразмерные, полученные аналогично. Переменные и параметры в относительных единицах:

$$\overline{u} = \frac{\vec{u}}{U_b}, \quad \overline{i} = \frac{\vec{i}}{I_b}, \quad \overline{\psi} = \frac{\vec{\psi}}{\psi_b} \quad - \quad \text{относительные электромагнитные}$$

переменные состояния.

$$\alpha_k = \frac{\omega_k}{\omega_b}, \quad \nu = \frac{\omega}{\omega_b} \quad - \quad \text{относительная частота статора и относительная}$$

скорость ротора.

$$m = \frac{M}{M_b} \quad - \quad \text{относительный момент на валу машины}$$

$$r_s = \frac{R_s}{R_{\sigma}}, \quad r_r = \frac{R_r}{R_{\sigma}}, \quad x_s = \frac{X_s}{R_{\sigma}} = \frac{X_{s\sigma} + X_m}{R_{\sigma}}, \quad x_r = \frac{X_r}{R_{\sigma}} = \frac{X'_{r\sigma} + X_m}{R_{\sigma}}, \quad x_m = \frac{X_m}{R_{\sigma}}$$

– относительные параметры.

В уравнениях (3.7.3) время принято безразмерным $\bar{t} = \frac{t}{t_b} = \omega_b \cdot t$, то есть

единицей измерения времени является не секунда, а $t_b = \frac{1}{\omega_b \cdot t}$.

Амплитудное значение номинального фазового напряжения:

$$U_{\bar{o}} = \sqrt{2} \cdot U_{1H} = \sqrt{2} \cdot 400 = 565,68 \text{ (В)} \quad (3.7.4)$$

Амплитудное значение номинального фазного тока:

$$I_{\bar{o}} = \sqrt{2} \cdot I_{1H} = \sqrt{2} \cdot 25,8 = 36,49 \text{ (А)} \quad (3.7.5)$$

Номинальное базисное сопротивление

$$R_{\bar{o}} = \frac{U_{\bar{o}}}{I_{\bar{o}}} = \frac{U_{HM}}{I_{HM}} = \frac{U_{1H}}{I_{1H}} = \frac{400}{25,8} = 15,5 \text{ (Ом)} \quad (3.7.6)$$

Номинальная угловая частота питающего напряжения двигателя

$$\omega_{\bar{o}} = \omega_{1H} = 2 \cdot \pi \cdot f_{1H} = 2 \cdot 3,14 \cdot 50 = 314 \text{ (рад/с)} \quad (3.7.7)$$

Базисное потокосцепление

$$\psi_{\bar{o}} = \frac{U_{\bar{o}}}{\omega_{\bar{o}}} = \frac{565,68}{314} = 1,8 \text{ (Вб)} \quad (3.7.8)$$

Базисная мощность

$$P_{\bar{o}} = \frac{3}{2} \cdot U_{\bar{o}} \cdot I_{\bar{o}} = \frac{3}{2} \cdot 565,68 \cdot 36,49 = 30962,5 \text{ (Вт)} \quad (3.7.9)$$

Базисный момент

$$M_{\bar{o}} = \frac{P_{\bar{o}} \cdot z_p}{\omega_{\bar{o}}} = \frac{30962,5 \cdot 1}{314} = 98,6 \text{ (Н·м)} \quad (3.7.10)$$

Полные индуктивные сопротивления обмоток статора и ротора

$$X_s = X_{s\sigma} + X_m = 1,436 + 60,203 = 61,64 \text{ (Ом)} \quad (3.7.11a)$$

$$X_r = X'_{r\sigma} + X_m = 1,942 + 60,203 = 62,145 \text{ (Ом)} \quad (3.7.116)$$

Индуктивности рассеяния обмоток статора и ротора

$$L_{s\sigma} = \frac{X_{s\sigma}}{2 \cdot \pi \cdot f_{1H}} = \frac{1,436}{2 \cdot 3,14 \cdot 50} = 0,0046 \text{ (Гн)} \quad (3.7.12)$$

$$L_{r\sigma} = \frac{X'_{r\sigma}}{2 \cdot \pi \cdot f_{1H}} = \frac{1,942}{2 \cdot 3,14 \cdot 50} = 0,0062 \text{ (Гн)} \quad (3.7.13)$$

Взаимная индуктивность

$$L_m = \frac{X_m}{2 \cdot \pi \cdot f_{1H}} = \frac{60,203}{2 \cdot 3,14 \cdot 50} = 0,192 \text{ (Гн)} \quad (3.7.14)$$

Полные индуктивности обмоток статора и ротора

$$L_s = L_{s\sigma} + L_m = 0,0046 + 0,192 = 0,1966 \text{ (Гн)} \quad (3.7.15)$$

$$L_r = L_{r\sigma} + L_m = 0,0062 + 0,192 = 0,1982 \text{ (Гн)} \quad (3.7.16)$$

Механическая постоянная времени электродвигателя в (о.е.)

$$T_m = \frac{J_{\Sigma} \cdot \omega_{\bar{\phi}}^2}{z_p \cdot M_{\bar{\phi}}} = \frac{0,32 \cdot 314^2}{1 \cdot 98,6} = 320 \quad (3.7.17)$$

Базовые значения активных сопротивлений

$$r_s = \frac{R_s}{R_{\bar{\phi}}} = \frac{1,008}{15,5} = 0,065$$

$$r_r = \frac{R_r}{R_{\bar{\phi}}} = \frac{0,987}{15,5} = 0,064 \quad (3.7.18)$$

$$\text{Базовое время} \quad \bar{t} = \omega_{\bar{\phi}} \cdot t \quad (3.7.19)$$

Базовые значения индуктивных сопротивлений

$$x_s = \frac{X_s}{R_{\bar{\phi}}} = \frac{61,64}{15,5} = 3,977$$

$$x_r = \frac{X_r}{R_{\bar{\phi}}} = \frac{62,145}{15,5} = 4,01 \quad (3.7.20)$$

$$x_m = \frac{X_m}{R_{\bar{\phi}}} = \frac{60,203}{15,5} = 3,884$$

Определим безразмерные коэффициенты

$$\begin{aligned}
 x'_s &= x_s - \frac{x_m^2}{x_r} = 3,977 - \frac{3,884^2}{4,01} = 0,215 \\
 k_r &= \frac{x_m}{x_r} = \frac{3,884}{4,01} = 0,966 \\
 r_\vartheta &= r_s + k_r^2 \cdot r_r = 0,065 + 0,966^2 \cdot 0,064 = 0,125 \\
 T'_s &= \frac{x'_s}{r_\vartheta} = \frac{0,215}{0,125} = 1,72 \\
 T_r &= \frac{x_r}{r_r} = \frac{4,01}{0,064} = 62,656
 \end{aligned} \tag{3.7.21}$$

Введение относительных величин существенно сокращает время моделирования и позволяет устранить многие проблемы при моделировании. Рассмотрим модели асинхронной машины в различных системах координат и их основные характеристики.

Схема асинхронной машины с короткозамкнутым ротором (АКЗ) получается из обобщенной схемы (рис.3.6), если обмотки ротора замкнуть накоротко. При этом в общих уравнениях следует положить $\overline{u_r} = 0$.

$$\left\{ \begin{aligned} \overline{u_s} &= r_s \cdot \overline{i_s} + \frac{d\overline{\psi_s}}{dt} + j \cdot \alpha_k \cdot \overline{\psi_s} \\ \overline{u_r} &= r_r \cdot \overline{i_r} + \frac{d\overline{\psi_r}}{dt} + j \cdot (\alpha_k - \nu) \cdot \overline{\psi_r} \\ \overline{\psi_s} &= x_s \cdot \overline{i_s} + x_m \cdot \overline{i_r} & (*) \\ \overline{\psi_r} &= x_r \cdot \overline{i_r} + x_m \cdot \overline{i_s} & (**) \\ m &= k \cdot \text{Mod}(\overline{\psi_i} \times \overline{i_k}) \end{aligned} \right. \tag{3.8.1}$$

Для динамических систем необходимо учитывать переходные электромагнитные процессы в машине. В этом случае в качестве пары

переменных, описывающих машину, оставим пространственные векторы тока статора и потокосцепления ротора.

Из уравнения (***) выразим вектор тока ротора:

$$\bar{i}_r = \frac{\bar{\psi}_r - x_m \cdot \bar{i}_s}{x_r}$$

Подставим в уравнение (*)

$$\bar{\psi}_s = x_s \cdot \bar{i}_s + \frac{x_m}{x_r} \cdot (\bar{\psi}_r - x_m \cdot \bar{i}_s)$$

После ряда преобразований получим

$$\begin{cases} \bar{u}_s - k_r \cdot \bar{u}_r = r \cdot \bar{i}_s + x_s' \cdot \frac{d\bar{i}_s}{dt} + k_r^2 \cdot r_r \cdot \bar{i}_s - \frac{k_r}{T_r} \cdot \bar{\psi}_r + j \cdot \nu \cdot k_r \cdot \bar{\psi}_r \\ 0 = -k_r \cdot r_r \cdot \bar{i}_s + \frac{1}{T_r} \cdot \bar{\psi}_r + \frac{d\bar{\psi}_r}{dt} + j \cdot (\alpha_k - \nu) \cdot \bar{\psi}_r \\ m = k \cdot \text{Mod}(\bar{\psi}_r \times \bar{i}_s) \\ \bar{T}_m \cdot \frac{d\nu}{dt} = m - m_n \end{cases} \quad (3.8.2)$$

Для того чтобы лучше понять физические процессы, происходящие в АД, исследуем машину в различных системах координат, сравним результаты и сделаем некоторые выводы, необходимые при построении электропривода на базе этой машины. Заметим, что для предоставления пространственных векторов используется комплексная плоскость.

3.2. Анализ асинхронного погружного электродвигателя в неподвижной системе координат

Анализ АД в неподвижной системе координат ($\omega_k=0$, $\alpha_k=0$) вещественная ось обозначается через α , а мнимая через β . Пространственные векторы в этом случае раскладываются по осям:

$$\left\{ \begin{array}{l} \overline{u_s} = u_{s\alpha} + j \cdot u_{s\beta} \\ \overline{u_r} = u_{r\alpha} + j \cdot u_{r\beta} \\ \overline{i_s} = i_{s\alpha} + j \cdot i_{s\beta} \\ \overline{\psi_r} = \psi_{r\alpha} + j \cdot \psi_{r\beta} \end{array} \right. \quad (3.9.1)$$

Подставив эти значения в уравнения (3.9.1) и приравняв отдельно вещественные и мнимые части, получим:

$$\left\{ \begin{array}{l} u_{s\alpha} - k_r \cdot u_{r\alpha} = r \cdot i_{s\alpha} + x_s' \cdot \frac{di_{s\alpha}}{dt} + k_r^2 \cdot r_r \cdot i_{s\alpha} - \frac{k_r}{T_r} \cdot \psi_{r\alpha} - v \cdot k_r \cdot \psi_{r\beta} \\ u_{s\beta} - k_r \cdot u_{r\beta} = r \cdot i_{s\beta} + x_s' \cdot \frac{di_{s\beta}}{dt} + k_r^2 \cdot r_r \cdot i_{s\beta} - \frac{k_r}{T_r} \cdot \psi_{r\beta} + v \cdot k_r \cdot \psi_{r\alpha} \\ 0 = -k_r \cdot r_r \cdot i_{s\alpha} + \frac{1}{T_r} \cdot \psi_{r\alpha} + \frac{d\psi_{r\alpha}}{dt} + v \cdot \psi_{r\beta} \\ 0 = -k_r \cdot r_r \cdot i_{s\beta} + \frac{1}{T_r} \cdot \psi_{r\beta} + \frac{d\psi_{r\beta}}{dt} - v \cdot \psi_{r\alpha} \\ m = k_R \cdot (\psi_{r\alpha} \cdot i_{s\beta} - \psi_{r\beta} \cdot i_{s\alpha}) \\ \overline{T_m} \cdot \frac{dv}{dt} = m - m_H \end{array} \right. \quad (3.9.2)$$

Система уравнений (3.9.2) в операторной форме примет вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} u_{s\alpha} - k_r \cdot u_{r\alpha} = r \cdot \left(1 + T_s' \cdot p\right) \cdot i_{s\alpha} - \frac{k_r}{T_r} \cdot \psi_{r\alpha} - v \cdot k_r \cdot \psi_{r\beta} \\ u_{s\beta} - k_r \cdot u_{r\beta} = r \cdot \left(1 + T_s' \cdot p\right) \cdot i_{s\beta} - \frac{k_r}{T_r} \cdot \psi_{r\beta} + v \cdot k_r \cdot \psi_{r\alpha} \\ 0 = -k_r \cdot r_r \cdot i_{s\alpha} + \left(\frac{1 + T_r}{T_r}\right) \cdot \psi_{r\alpha} + v \cdot \psi_{r\beta} \\ 0 = -k_r \cdot r_r \cdot i_{s\beta} + \left(\frac{1 + T_r}{T_r}\right) \cdot \psi_{r\beta} - v \cdot \psi_{r\alpha} \\ m = k_r \cdot (\psi_{r\alpha} \cdot i_{s\beta} - \psi_{r\beta} \cdot i_{s\alpha}) \\ T_m \cdot p \cdot v = m - m_H \end{array} \right. \quad (3.9.3)$$

Модель АД, построенная по уравнениям (3.9.3), представлена на рисунке 12., а результаты моделирования на рисунке 12,13,14.

На вход модели в момент времени $t=0$ подаются напряжения $u_{s\alpha} = \cos(t)$, $u_{s\beta} = \sin(t)$, тем самым реализуя прямой пуск.

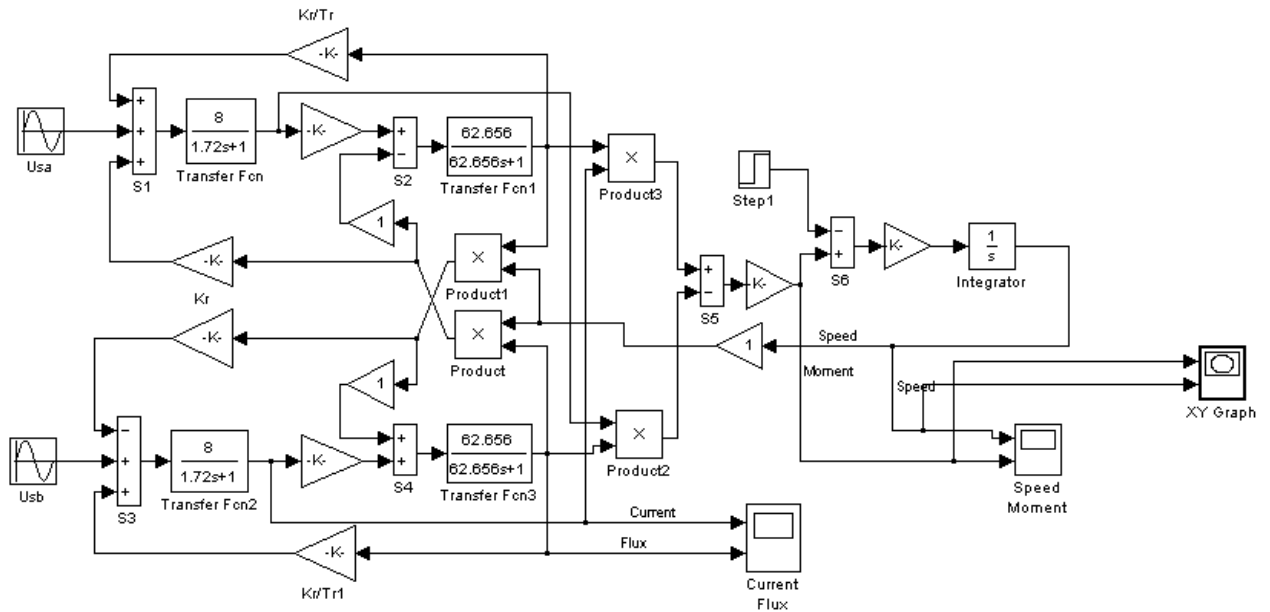


Рисунок 12. Модель погружного электродвигателя в неподвижной системе.

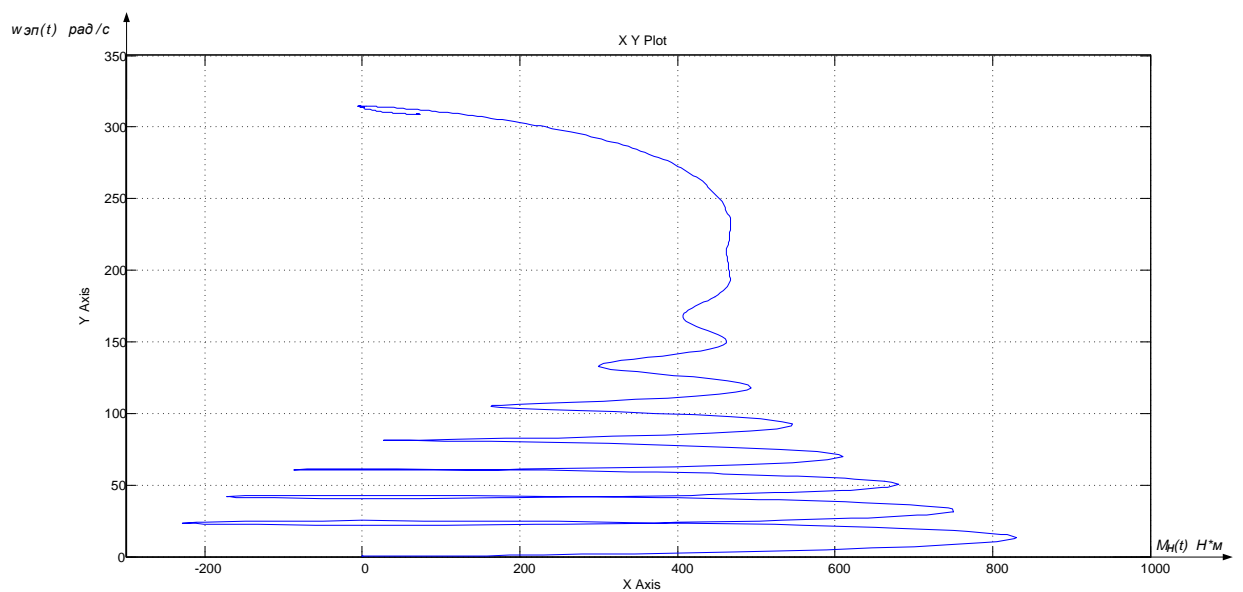


Рисунок 13. Динамическая механическая характеристика ПЭД.

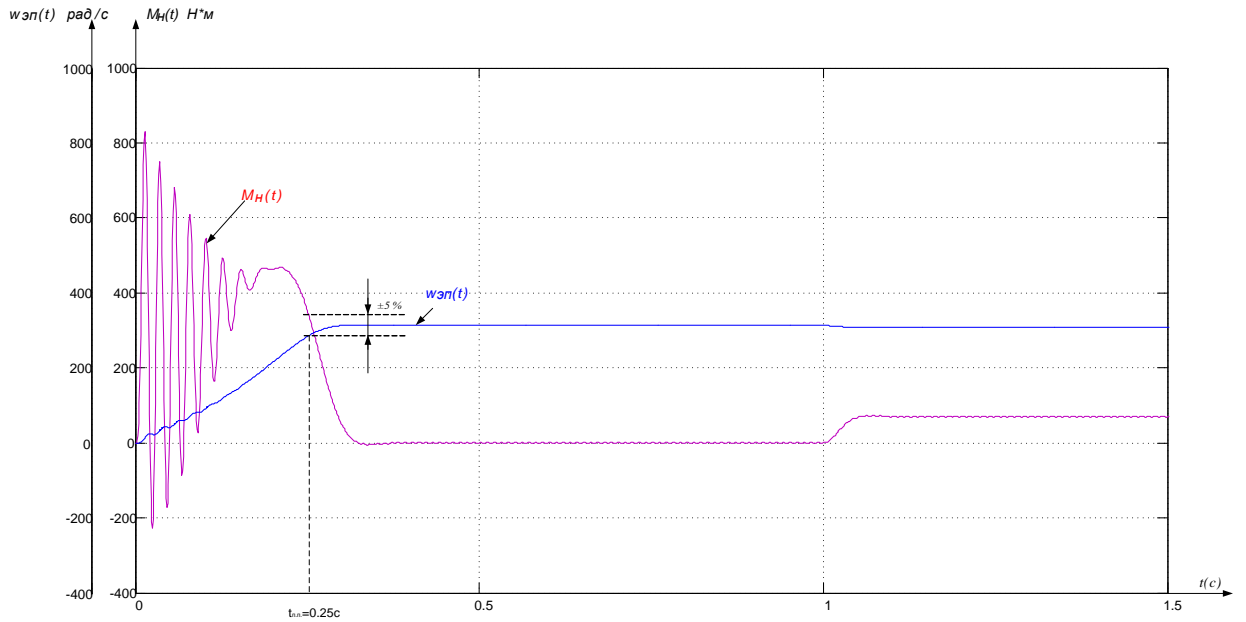


Рисунок 14. График переходного процесса пуска без нагрузки скорости и момента ПЭД с последующим набросом нагрузки.

В результате моделирования были получены переходные процессы по скорости и моменту. Из рисунка видно, что без нагрузки двигатель развил скорость равную синхронной, а при набросе нагрузки скорость просела.

3.3. Анализ ПЭД во вращающейся системе координат

Во вращающейся с относительной скоростью α_k системе координат с вещественной осью x и мнимой осью y уравнения (3.9.3) в операторной форме запишутся в виде :

$$\left\{ \begin{array}{l} u_{sx} - k_r \cdot u_{rx} = r \cdot \left(1 + T_s' \cdot p\right) \cdot i_{sx} - x_s' \cdot \alpha_k \cdot i_{sy} - \frac{k_r}{T_r} \cdot \psi_{rx} - v \cdot k_r \cdot \psi_{ry} \\ u_{sy} - k_r \cdot u_{ry} = r \cdot \left(1 + T_s' \cdot p\right) \cdot i_{sy} - x_s' \cdot \alpha_k \cdot i_{sx} - \frac{k_r}{T_r} \cdot \psi_{ry} + v \cdot k_r \cdot \psi_{rx} \\ 0 = -k_r \cdot r_r \cdot i_{sx} + \left(\frac{1 + T_r}{T_r}\right) \cdot \psi_{rx} - (\alpha_k - v) \cdot \psi_{ry} \\ 0 = -k_r \cdot r_r \cdot i_{sy} + \left(\frac{1 + T_r}{T_r}\right) \cdot \psi_{ry} + (\alpha_k - v) \cdot \psi_{rx} \\ m = k_r \cdot (\psi_{rx} \cdot i_{sy} - \psi_{ry} \cdot i_{sx}) \\ T_m \cdot p \cdot v = m - m_H \end{array} \right. \quad (3.10.1)$$

Модель АД во вращающейся системе координат, составленная по уравнениям (3.10.1) представлена на рисунке 15, а результаты моделирования на рисунке 16,17.

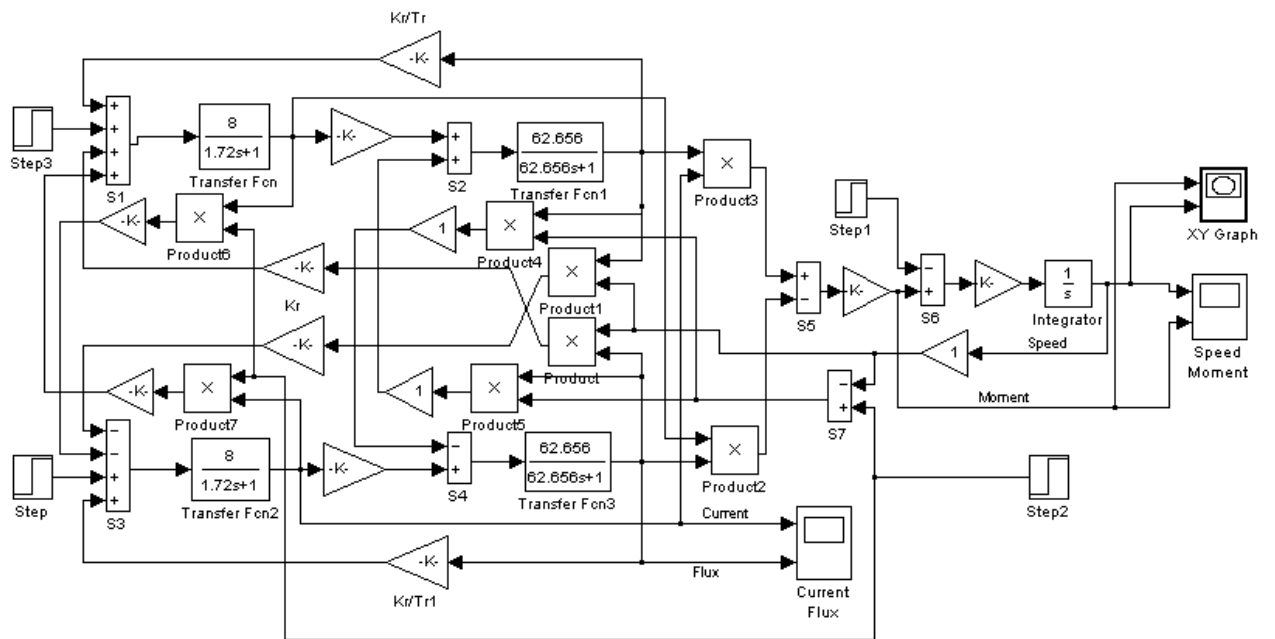


Рисунок 15 – Модель ПЭД во вращающейся системе координат.

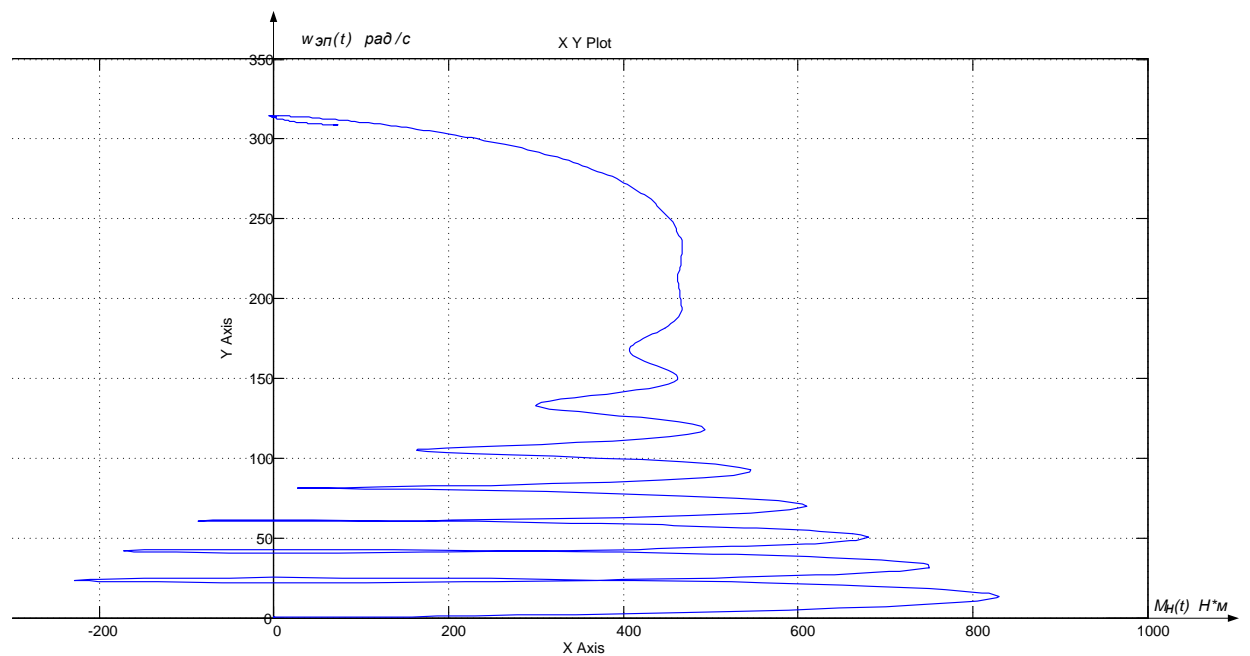


Рисунок 16. Динамическая механическая характеристика ПЭД (вращающиеся система).

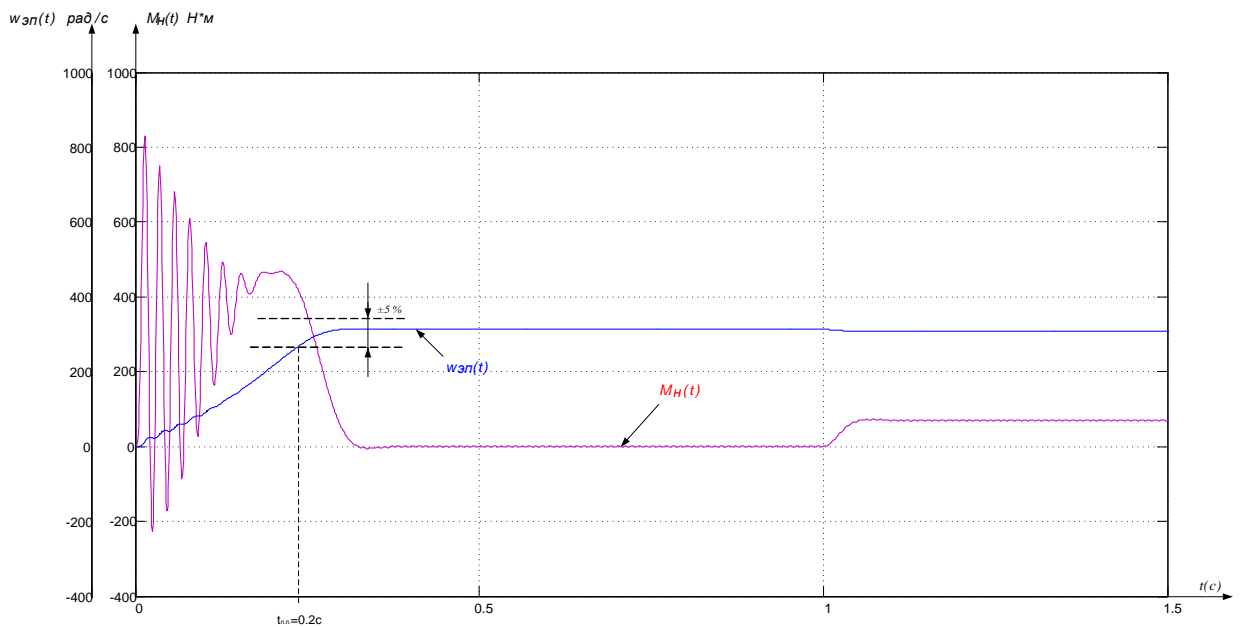


Рисунок 17. . График переходного процесса пуска без нагрузки скорости и момента ПЭД с последующим набросом нагрузки.

Сравнивая результаты моделирования в неподвижной и во вращающейся системе координат, можно сделать вывод об их полной идентичности. Вид переходных процессов при прямом пуске асинхронного электродвигателя показывает наличие колебательной составляющей в кривой электромагнитного момента и затухающей по мере разгона двигателя. При достижении динамической характеристикой критического значения, двигатель имеет максимальное ускорение. Большие ударные моменты при пуске двигателя могут приводить к выходу из строя механизма машины. Значения токов обмоток статора во время разгона двигателя достигают значения в несколько сот ампер, что приводит к выходу из строя обмотки статора двигателя, по окончании времени разгона ток уменьшается до номинального. В итоге прямой пуск асинхронного двигателя не позволяет получить удовлетворительных переходных характеристик с этой целью на входе был установлен задатчик интенсивности

Графики переходных процессов с использованием задатчика интенсивности представлены на рисунке 18.

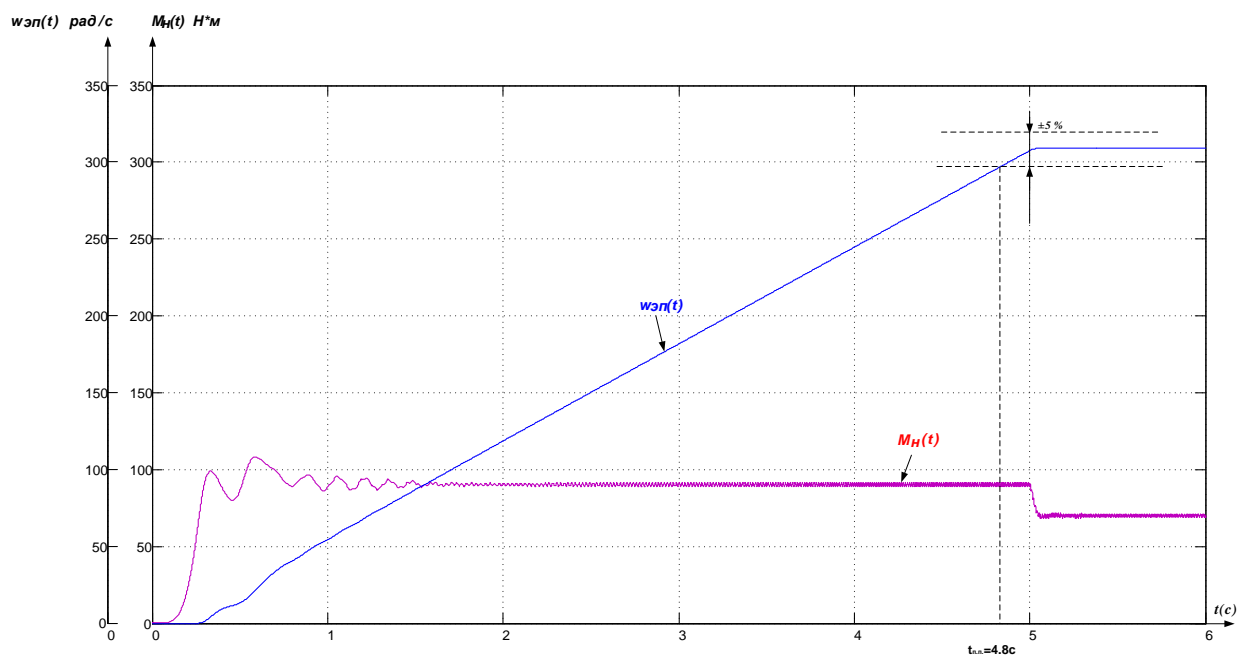


Рисунок 18. График переходного процесса пуска под нагрузкой скорости и момента ПЭД с использованием задатчика интенсивности..

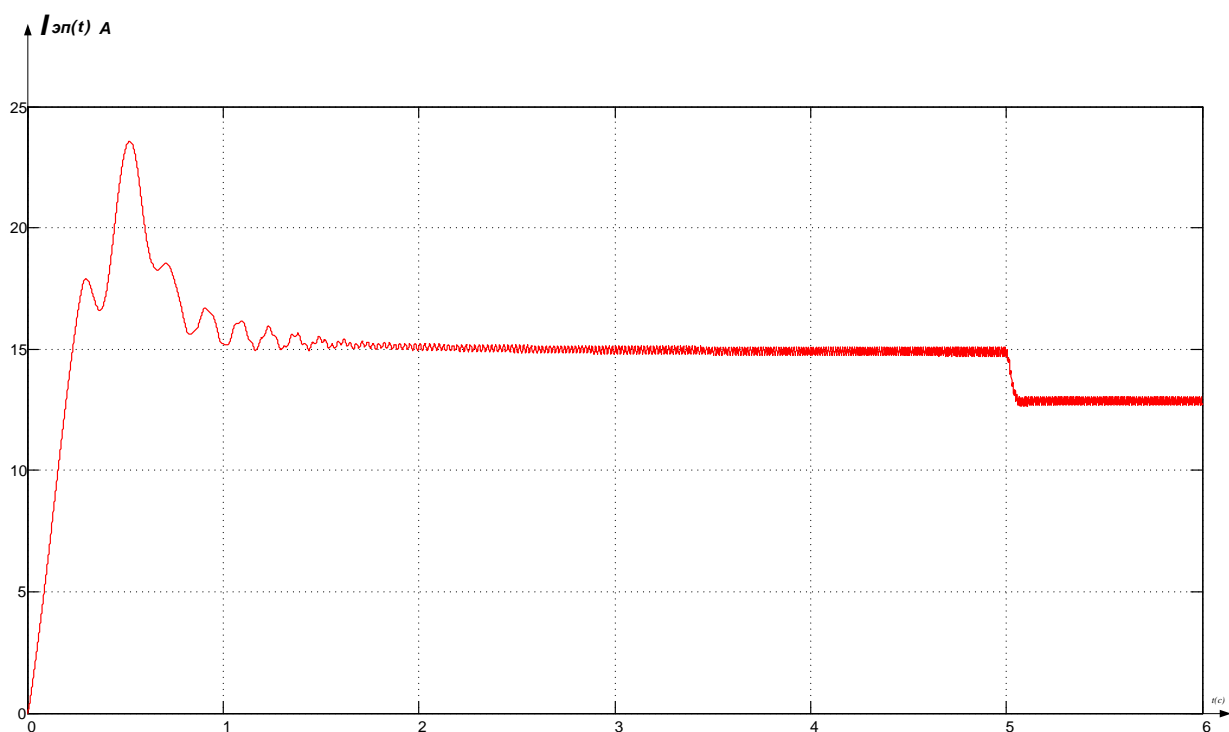


Рисунок 19.- График переходного процесса пуска под нагрузкой тока статора с использованием задатчика интенсивности..

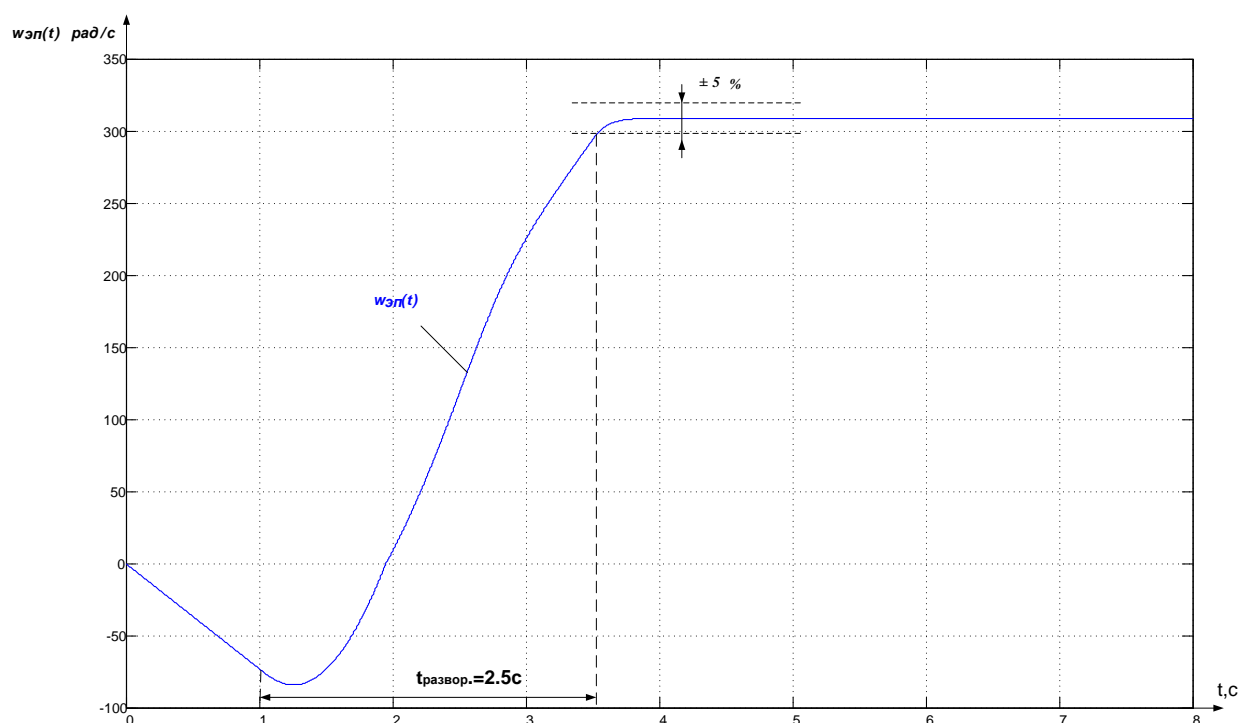


Рисунок 19.- График переходного процесса при развороте турбинного вращения.

Проанализировав полученные графики переходных процессов, можно сказать, что разработанный электропривод удовлетворяет предъявляемым требованиям. Применение задатчика интенсивности исключает колебательность переходного процесса и обеспечивает заданный темп разгона.

4 РАСЧЕТ И ВЫБОР КАБЕЛЬНОЙ ЛИНИИ УЭЦН

При изучении процессов протекающих в кабельной линии УЭЦН, необходимо учесть особенности ее конструкции. Так, кабельная линия в общем случае составлена из нескольких участков кабеля, соединенных между собой с помощью соединительных муфт. Кроме того, если позволяет диаметр обсадной колонны скважины, большая часть кабельной линии выполнена круглым кабелем, а участок в непосредственной близости от погружного электродвигателя — плоским кабелем меньшего сечения. Соединение этих участков также производится с помощью соединительной муфты.

Кабельную линию в целом характеризуют потери напряжения ΔU и потери мощности ΔP в линии. Эти величины зависят от напряжения питания, тока нагрузки, коэффициента, мощности нагрузки, а также, от параметров линии.

4.1. Схема замещения кабельной линии

Основными параметрами, характеризующими кабельную линию, являются активные сопротивления фаз R_A , R_B , R_C , распределенные собственные индуктивности фаз L_A , L_B , L_C , распределенные емкости фаз относительно экрана C_A , C_B , C_C , а также межфазные взаимные индуктивности M_{AB} , M_{BC} , M_{AC} и емкости C_{AB} , C_{BC} , C_{AC} .

В общем случае; указанные параметры различны для каждого из участков, что связано с производственным разбросом параметров, старением изоляции, разным качеством электрических соединений в муфтах. Кроме того, необходимо, учитывать широкий диапазон изменения температуры окружающей среды в зависимости от глубины подвески погружного оборудования и, как следствие, изменение параметров кабеля на разных участках в зависимости от температуры.

Таким образом, режим работы каждого из участков кабельной линии зависит от параметров всех остальных участков, источника питания, характера и величины нагрузки, а также условий окружающей среды. Следовательно, от

совокупности этих факторов зависят параметры линии в целом и режим работы всего электротехнического комплекса УЭЦН.

Схема замещения одной фазы такой кабельной линии, представляемой n участками, работающей в составе электротехнического комплекса УЭЦН приведена на рисунке 20, а соответствующая энергетическая структурная модель - на рисунке 21.

Приведенная модель характеризуется следующими параметрами:

Общее количество, подсистем $K - 2n$;

Количество электрических подсистем $K_{\text{э}} - n$;

Количество тепловых подсистем $K_{\text{т}} - n$;

Общее количество преобразователей энергии (ПЭ) $P - 2n$;

Количество ПЭ вида «электрическая - электрическая» $P_{\text{ээ}} - n$;

Количество ПЭ вида «электрическая - тепловая» $P_{\text{эт}} - n$;

Количество силовых каналов передачи энергии $C - 1$;

Количество ступеней преобразования в силовых каналах $ПС - n$;

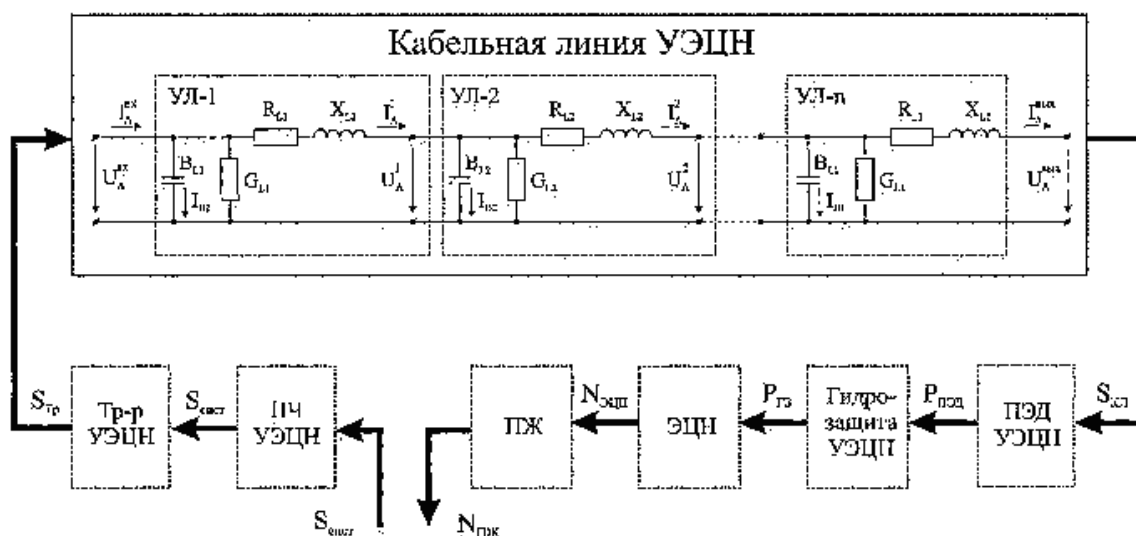


Рисунок 20. Схема замещения кабельной линии, функционирующей в составе ЭТК УЭЦН.

4.2 Расчет параметров схемы замещения

Для оценки кабельной - линии УЭЦН, произведем расчет параметров схемы замещения для простейшего случая, когда линия состоит из одного участка кабеля. Линия выполнена плоским кабелем КПБП сечением Л 6 мм. Длина кабеля. 1500 метром. Линия питает погружной, электродвигатель типа ПЭДТН22-103В5 - производства ЗАО «Новомет» мощностью 22 кВт, с номинальным напряжением. 700 В. Коэффициент мощности двигателя равен. 0,879; к.п.д. - 81%,

Принимая во внимание симметричный характер нагрузки, какой является асинхронный электродвигатель, оценим потери напряжения и мощности в одной фазе исследуемой линии, аппроксимируя последнюю схемой с сосредоточенными параметрами. Учитывая относительно небольшую длину; кабельных линий УЭЦН-(до 3 км), применим; Г-образную. схему замещения (рисунок 21),

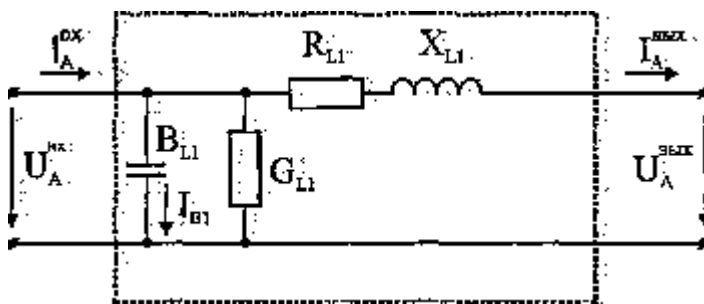


Рисунок 21. Г-образная схема замещения кабельной линии УЭЦН.

Активное сопротивление линии :

$$R_L = l \cdot R_0 = l \cdot \frac{1}{s \cdot \lambda} = 1500 \cdot \frac{1}{16 \cdot 50} = 1.875 \text{ Ом}$$

где $s=16 \text{ мм}^2$ — сечение линии, $\lambda=50 \text{ мСм}$ — удельная проводимость меди.

Индуктивное сопротивление линии:

$$X_L = l \cdot X_0 = l \cdot 0.02 \cdot \pi \cdot \left(\ln \frac{a}{\gamma} + \frac{1}{4} \right) = 1500 \cdot 0.08 \cdot 10^{-3} = 0.12 \text{ Ом.}$$

где- $a = \sqrt[3]{a_1 a_2 a_3}$ - среднегеометрическое расстояние между фазными проводниками кабеля, λ - приведенный радиус фазного проводника;

Реактивная проводимость кабельной линии, имеющая емкостной характер, определяется следующим образом :

$$b_L = l \cdot b_0 = l \cdot (31 + 9\sqrt{s}) = 1500 \cdot (31 + 9\sqrt{16}) = 100.5 \cdot 10^3 \text{ нСм.}$$

Оценим величину потерь напряжения в кабельной линии УЭЦН в номинальном режиме работы электродвигателя.

Активная мощность, потребляемая двигателем в номинальном режиме работы:

$$P_{1H} = P_{2H} / \eta = 22 / 0,81 = 27,16 \text{ кВт.}$$

Реактивная мощность :

$$Q_{1H} = P_{1H} \cdot \tan(\varphi) = 27,16 \cdot \tan(\arccos(0.879)) = 16.13 \text{ кВАр.}$$

Тогда потери напряжения

$$\Delta U_H = \frac{P_{1H} \cdot R_L + Q_{1H} \cdot X_L}{U_{1H}} = \frac{27160 \cdot 1.875 + 16130 \cdot 0.12}{700} = 75.5 \text{ В,}$$

что составляет 11% от величины питающего напряжения.

5. ВЫБОР ТРАНСФОРМАТОРА ДЛЯ ПИТАНИЯ ПОГРУЖНОГО НАСОСА

Исходя из расчета кабельной линии и мощности погружного электродвигателя, выберем повышающий трансформатор:

Трансформатор ТМПН-63/856-73ХЛ1:

Номинальная мощность $S_N = 63$ кВА..

Номинальное первичное напряжение $U_N = 380$ В.

Номинальное вторичное напряжение $U_{2N} = 781$ В.

Напряжения ступеней регулирования:

1023-982-941-900-856-824-781-739-698-657 В.

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

Группа	ФИО
3-5г3а1	Зайцев И.

Школа	Инженерная школа энергетики	Отделение	Электроэнергетика и электротехника
Уровень образования	Бакалавриат	Направление/специальность	Электроэнергетика и электротехника

Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:

1. Характеристика объекта исследования (вещество, материал, прибор, алгоритм, методика, рабочая зона) и области его применения	Рабочее место представляет собой площадка на открытом воздухе, находящиеся на высоте вблизи электрооборудования под высоким напряжением.
--	--

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

<p>1. Производственная безопасность</p> <p>1.1. Анализ выявленных вредных факторов при разработке и эксплуатации проектируемого решения в следующей последовательности:</p> <p>1.2. Анализ выявленных опасных факторов при разработке и эксплуатации проектируемого решения в следующей последовательности:</p>	<p>Вредные факторы производственной среды: Воздействие вредных газов и паров, запыленность Метеорологические условия; Повышенный уровень вибрации; Повышенный уровень шума; Пониженный уровень освещения;</p> <p>Опасные факторы производственной среды Движение машины и механизмов; Электрический ток; Высокое давление трубопровода; Пожароопасность;</p>
<p>2. Экологическая безопасность:</p> <ul style="list-style-type: none"> — защита селитебной зоны — анализ воздействия объекта на атмосферу (выбросы); 	<p>Остатки добываемого сырья Бытовые отходы</p>

<ul style="list-style-type: none"> – анализ воздействия объекта на гидросферу (сбросы); – анализ воздействия объекта на литосферу (отходы); – разработать решения по обеспечению экологической безопасности со ссылками на НТД по охране окружающей среды. 	
3. Безопасность в чрезвычайных ситуациях: <ul style="list-style-type: none"> – перечень возможных ЧС при разработке и эксплуатации проектируемого решения; – выбор наиболее типичной ЧС; – разработка превентивных мер по предупреждению ЧС; – разработка действий в результате возникшей ЧС и мер по ликвидации её последствий. 	Пожар на территории объекта. Вмешательство сторонних лиц (теракт)
4. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности: <ul style="list-style-type: none"> – специальные (характерные при эксплуатации объекта исследования, проектируемой рабочей зоны) правовые нормы трудового законодательства; – организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны. 	Возрастные ограничения, требования к образованию. Специальные нормы, предусмотренные спецификой выполняемых работ. Организация рабочего места.

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	
--	--

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент	Мезенцева И.Л.			

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
3-5г3а1	Зайцев И.		

6.СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ

ВВЕДЕНИЕ

Социальная ответственность – это объективная необходимость отвечать за нарушения социальных норм. Она определяет характер взаимоотношение человека с окружающим обществом, людьми. В основе социальной ответственности лежит общественная природа поведения человека.

Цель данного раздела выявить и проанализировать опасные и вредные факторы, имеющие на добычи пластовой жидкости, и разработка мер по снижению вредных факторов воздействующих на обслуживающий персонал. Данные мероприятия должны учитывать нормы, правила, инструкции, документы, закрепленные в нормативно правовых актах. Добыча пластовой жидкости в частности нефти и газа, воды - трудный и опасный процесс, требующий от персонала специальных навыков и технической подготовки для работы на специальном дорогостоящем оборудовании. УЭЦН – сложная электромеханическая установка, имеющая в своем составе вращающиеся детали, находящиеся под давлением трубопроводы и токоведущие кабели, отчего является объектом повышенной опасности. Главной задачей улучшения условия труда является обеспечения безопасности труда, снижения уровня производственного травматизма, сохранение здоровья и жизни рабочего персонала. Для обеспечения безопасности труда необходимо строго выполнять требования техники безопасности, использовать средства индивидуальной защиты от вредных и опасных факторов появляющиеся при производственной деятельности. Здоровье и безопасность труда персонала должны быть обеспечиваться выполнением норм и правил при монтаже УЭЦН, так и при их эксплуатации.

6.1 Производственная безопасность

Производственная безопасность — система организационных мероприятий и технических средств, предотвращающих или уменьшающих вероятность воздействия на работающих опасных травмирующих

производственных факторов, возникающих в рабочей зоне в процессе трудовой деятельности.

К производственной безопасности относятся организационные мероприятия и технические средства защиты от поражения электрическим током, защита от механических травм движущимися механизмами, подъемно-транспортными средствами, обеспечение безопасности систем высокого давления, методы и средства обеспечения пожаровзрыво безопасности и т. д.

6.1.1 Анализ выявленных вредных факторов проектируемой производственной среды.

Воздействие вредных газов и паров, запыленность.

Площадка, как правило, засыпаются песком, чтобы исключить скользкие места в зимний период, поэтому при сильных ветрах случается поднятие частиц песка и пыли, которые могут попасть в глаза и верхние дыхательные пути. Нормирование метеорологических параметров устанавливает ГОСТ 12.1.005-76.

В ходе производственных операций рабочие могут подвергаться воздействию вредных газов и паров, источником которых являются нарушения герметичности фланцевых соединений, механической прочности фонтанной арматуры (свище, щели по шву) вследствие внутренней коррозии или износа, превышения максимально допустимого давления, отказы или выходы из строя регулирующих и предохранительных клапанов. Пары газа при определенном содержании их в воздухе могут вызвать отравления и заболевания. При постоянном вдыхании природных газов и поражается центральная нервная система, снижается артериальное давление, становится реже пульс и дыхание, понижается температура тела. Высокое давление и загазованность указывают на повышенную пожара и взрывоопасность объекта. Для борьбы с воздействием данного фактора необходимо применять средства защиты дыхательных путей СИЗОД (респираторы, лепестки)

Метеорологические условия

Рабочее место представляет собой площадка на открытом воздухе, находящиеся на высоте вблизи электрооборудования под высоким напряжением. Длительное время пребывания персонала в условиях низких или высоких температур, высокая влажность (летом - дожди).

Одна из главных особенностей условий труда операторов по добычи из пластов – это работа, в основном, на открытом воздухе, а также работа, связанная с перемещениями на территории объекта и между объектами, частыми подъемами на специальные площадки, находящиеся на высоте. Поэтому в условиях сурового климата Западной Сибири и Крайнего Севера с низкими температурами (зимой до -50°C) и высокой влажностью (летом до 100%) играют метеорологические факторы. При низкой (сверхдопустимых норм) температуре окружающей среды тепловой баланс нарушается, что вызывает переохлаждение организма, ведущее к заболеванию. В случае низкой температуры воздушной среды уменьшается подвижность конечностей вследствие интенсивной теплоотдачи организм, что сковывает движения. Это может послужить причиной несчастных случаев и аварий.

При высокой температуре снижаются внимание и скорость реакции работающего, что может послужить причиной несчастного случая и аварии. При работе в летнее время при высокой температуре (до $+50^{\circ}\text{C}$) возможны перегревания организма, солнечные и тепловые удары.

Для снижения влияния метеорологических условий необходимо применять, спецодежду установленного образца, исходя из климатических условий района, где выполняются, работы по добычи из пластов. А так же оборудования мест обогрева и отдыха персонала в течение рабочего времени, и отведение времени из рабочего времени на данные мероприятия.

Повышенный уровень вибрации

Источником вибрации при работе насосной станции, одним из важным моментом в работе оборудования является его вибрация, в результате не сбалансированных его узлов, элементов или особенности конструкции.

Воздействие производственной вибрации на человека вызывает как физиологического, так и функционального состояния организма человека: повышения утомляемости, увеличение времени двигательной и зрительной реакции, нарушения вестибулярного реакций и координации движений, что ведет к снижению работоспособности и производительности труда, также происходит развитие нервных заболеваний, нарушения функции сердечнососудистой системы, нарушение опорно-двигательной системы, поражения мышечных тканей и суставов. Допустимые значения виброускорений не должны превышать [ГОСТ 12.1.012].

Для борьбы с вибрацией оборудования, к их элементам конструкции применять материалы поглощающие вибрацию, в частности специальные сплавы, пластмассы, резины, вибродемпфирующие покрытия. Для поглощения общей вибрации оборудования использовать виброгасящие фундаменты.

Повышенный уровень шума

Процесс добычи ископаемых связан с работой множества приводов и механизмов, которые издадут различные шумы. Для снижения шума необходимо применять различные методы коллективной защиты:

Уменьшение уровня шума в источнике его возникновения;

Рациональное размещение оборудования;

Борьба с шумом на путях его распространения, в том числе изменения направленности излучения шума;

Использование средств звукоизоляции, звукопоглощение и установка глушителей шума, в том числе акустическая обработка поверхностей помещения.

Борьба с шумом заключается, в поглощение его источника. Для снижения механического шума необходимо смазывать трущиеся места механизмов, проводить своевременный ремонт оборудования, применять балансировку вращающихся частей. Снижения шума в электрических машинах путем изменения их конструкции.

Пониженный уровень освещенности

В процессе работы на персонал влияет фактор пониженного освещенности рабочего места. Неудовлетворительное освещение может искажать информацию, кроме того вызывать утомление всего организма в целом. Освещение должно обеспечивать работу без напряжения зрения.

На площадках используется естественное, совмещенное и искусственное освещение. Для освещения помещений применяется газоразрядные лампы низкого и высокого давления – люминесцентные, натриевые, металлогенные, дуговые ртутные лампы.

Освещение делится на рабочее, аварийное, охранное. Рабочее включает в себя стационарное, местное, ремонтное освещение. Охранное освещение предусматривается по периметру производственной площадки. Ремонтное освещение необходимо запитать от источника пониженного напряжения 12- 42 В. При выполнении точных работ, следует использовать переносные светильники.

Таблица 1- Нормы освещенности рабочих поверхностей при искусственном освещении основных производственных зданий и площадок в нефтяной промышленности. (СНиП I – 4-79).

Наименование объекта	Освещенность (ЛК) при общем освещении лампами накаливания
Рабочая площадка	30
Роторный стол	100
Пульт и щит управления безизмерительной аппаратуры (рычаги, рукоятки)	75
Пульт и щит управления с измерительной аппаратурой	150
Маршевые лестницы, переходы	10
Насосные станции	50
Места управления задвижками на территории резервуарных парков	30

6.2 Анализ выявленных опасных факторов, которые могут возникнуть при эксплуатации объекта исследования

Движущиеся машины и механизмы.

Опасность для персонала представляет движение механизмов и узлов оборудования. Для предотвращения травматизма необходимо проводить инструктажи по ТБ. Определить маршруты безопасного прохода персонала к рабочим местам, с указанием их, используя соответствующие информационных таблички. Механизмы, выполняющие движущие либо вращающие функции должны быть обеспечены защитными кожухами, если не возможна установка их, выполняется ограждение опасного механизма.

Электрический ток.

Эксплуатация скважин с УЭЦН характеризуется с наличием высокого напряжения в силовом кабеле. Причем станция управления и скважина оборудования УЭЦН обычно находятся, на расстоянии друг от друга и часть кабеля проходит по поверхности, что увеличивает зону поражения электротоком, а, следовательно, и вероятность несчастного случая. Электрический ток, протекая через тело человека, производит термическое, механическое, электролитическое, биологическое действие.

К электротравмам относят электрический удар, при котором происходит сокращение различных мышц, что приводит к судорогам, нарушению сердечной деятельности и остановке дыхания. Остановка сердца связана с фибрилляцией – хаотичное сокращении сердечной мышцы.

Для защиты персонала от возможного поражения током необходимо, чтоб работы связанные с монтажом (демонтаж) погружного агрегата УЭЦН и его обслуживание допускаются электротехнический персонал, знающих схемы подключения, прошедших обучения , стажировку, а так же проверку знаний с присвоением квалификационной группы по электробезопасности. Работы выполнять в СИЗ (диэлектрических перчатках).

Высокое давление трубопроводов.

В процессе работы УЦЭН все трубопроводы находятся под давлением. Для замера и контроля за давлением должны быть установлены стационарные манометры с трехходовыми кранами. Конструкция устьевого оборудования должна обеспечивать возможность снижения давления в затрубном пространстве, а так же закачку жидкости для глушения скважины. Персонал в течении смены должен производить контроль за работой оборудования в частности и за давлением в трубопроводах, с помощью показаний манометров. Проверять герметичность фланцевых соединений, проверяют правильность настройки регуляторов давления и предохранительных устройств (предохранительные запорные клапаны, клапаны блокировки, сбросные и отсека тельные клапаны).

Пожароопасность

Площадки по откачки пластовой жидкости являются опасным исходя из пожарной безопасности объектом, в зависимости от рода откачиваемой жидкости присваивается категория по пожарной безопасности.

Опасным фактором для человека является открытый огонь, продукты горения токсичных продуктов, повреждение и обрушение здания, взрыв.

Для предотвращения пожара необходимо выполнять ряд профилактических мероприятий:

1. Предотвращать образование горючей среды.
2. Предотвращать образование в горючей среде источников зажигания.
3. Уменьшение объема горючей среды.
4. Контроль за исправностью электрооборудования.

Территории должны быть оборудованы пожарные щиты, с необходимыми первичными средствами тушения. Персонал должен быть проинструктирован по поведению в случаях пожарной ситуации, уметь пользоваться первичными средствами пожаротушения, владеть информацией по эвакуации с объекта.

Для тушения пожара используют следующие средства пожаротушения: ручные пенные огнетушители типа ОП, углекислотные огнетушители ОУ-2, Пено производящие установки – Пено смесителя, воздушно пенные стволы, генераторы высокократной пены, гидранты и другие средства.

6.3 Экологическая безопасность

В процессе эксплуатации УЭЦН возможно загрязнение окружающей среды смазочными материалами. При добычи пластовой жидкости в частности нефти, газа и т.д., наносится большой вред недрам земли, так как данные ресурсы являются не возобновляемыми, поэтому по истощению промышленного объема залежей приходится бурить новые скважины и заново монтировать оборудование. Добывающий участок постоянно перемещается, оставляя за собой остатки добываемого сырья, мусора (остатки жизнедеятельности человека). Все это наносит большой вред живой природе, влияет на гидрологию, климат, условия жизни местного населения. Химические вещества, пыль, бытовые отходы заражают воздух, воду, почву воздействуют на биопродуктивность водоемов и окружающей животный мир. Для снижения интенсивности загрязнения необходимо проводить ряд мероприятий:

Для снижения выброса вредных веществ в воздух необходимо, создавать препятствия на пути их распространения используя различные фильтры и создания полос озеленения вокруг производственного объекта.

Для снижения воздействия на гидросферу необходимо: регулярная проверка, и анализ выброса вредных веществ в сточные воды, водоемы, создания систем очистки.

Для снижения выброса бытовых отходов, отходов промышленного производства, необходимо производить утилизацию – переработку отходов. Для временного хранения отходов использовать площадки ТБО.

Рациональное использование и обязательную рекультивацию земель после бурения.

6.4 Защита при ЧС

Насосные станции в соответствии с требованиями постановления Правительства Российской Федерации от 19.09.1998г №1115 « О порядке отнесения организации к категориям по гражданской обороне» отнесены к объектам по гражданской обороне.

На насосные станции могут повлиять следующие опасности:

1. Разрушение в следствии воздействия техногенного характера.

Для исключения вероятности данного ЧС необходимо : на территории не хранить вещества химического и радиоактивного характера. Учесть при проектировании два независимых источника питания, так как станция относится к первой категории по электроснабжению.

2. Пожар на территории объекта.

3. Вмешательство сторонних лиц (теракт)

Для снижения риска вероятности ЧС необходимо : проработать с персоналом методику снижения риска ЧС, действия при ЧС. На объекте необходимо учесть при проектировании средства доведения сигналов оповещения при ГО и ЧС до персонала. На объекте должно быть наличие дополнительного источника электропитания, запасов питьевой воды, запасных частей для оборудования.

6.5 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности

До работы на установке УЭЦН допускаются только обученные и аттестованные лица не моложе 18 лет, имеющие профильное образование , годные по состоянию здоровья, что должно быть подтверждено результатами медицинского освидетельствования. В соответствии со ст.104 ТК РФ допускается введение суммированного учета рабочего времени с учетным периодом три месяца. В случае, если по причинам сезонного или технологического характера, установленная продолжительность рабочего времени не может быть соблюдено в течение учетного периода продолжительностью 3 месяца отраслевая(межотраслевая) соглашением и коллективным договором может быть предусмотрено увеличением учетного

периода для учета рабочего времени Таких работников Но не более чем 1 года. При этом продолжительность рабочего времени за отчетный период не может превышать нормального числа рабочих часов.

При проведении работ в зимнее время, то согласно ст. 109 ТК РФ оператор имеет право перерыв на обогрев, которые входят в рабочее время.

Согласно ст. 117 ТК РФ оператору предоставляется ежегодный дополнительный оплачиваемый отпуск в силу условий труда, минимальная продолжительность которого составляет 7 календарных дней.

Организация рабочего места

Территория предприятия и размещение на ней сооружений, зданий, производственных объектов должны соответствовать проекту, разработанному с учетом требований СНиП 11-89-80. Буровые, насосные и компрессорные станции, другие производственные объекты должны иметь надежное транспортное сообщение с базами материально – технического сообщения и местами дислокации основных производственных служб предприятия. Трубопроводы в местах пересечения с автомобильными дорогами, переходами должны иметь знаки предупреждения об опасности. От крайнего ряда эксплуатационных скважин, а также от каждого объекта нефтяного или газового месторождения устанавливается санитарно – защитная зона, размеры которой определяются по нормам СН – 245 – 71 в соответствии с принятыми методическими рекомендациями. При наличии в продукции месторождений вредных примесей между промышленными объектами, добывающими, транспортирующими или перерабатывающими эту продукцию, и жилыми объектами должна быть установлена буферная зона, величина которой устанавливается при проектировании. Рабочие места, объекты, проезды и подходы к ним, проходы и переходы в темное время суток должны быть освещены. Искусственное освещение выполняется в соответствии с требованиями «Правил устройства электроустановок» и строительных норм и правил, установленных СН 245-71, СН 433-79 и СНиП 23-05-95. Объекты, для обслуживания которых требуется подъем рабочего на высоту до 0,75 м,

оборудуются ступенями, а на высоту выше 0,75 м – лестницами с перилами. Работы, связанные с опасностью падения работающего с высоты должны проводиться с применением предохранительного пояса. Открывать дверцы ограждений или снимать ограждения следует после полной остановки оборудования или механизма. Пуск оборудования или механизма разрешается только после установки на место и надежного закрепления всех съемных частей ограждения.

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ»

Студенту:

Группа	ФИО
3-5Г3А1	Зайцеву Игорю --

Школа	Инженерная школа энергетики	Отделение	Электроэнергетика и электротехника
Уровень образования	Бакалавриат	Направление/специальность	Электроэнергетика и электротехника

Исходные данные к разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»:

1. *Стоимость ресурсов технического проекта*
2. *Нормы и нормативы расходования ресурсов*
3. *Используемая система налогообложения*

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. *Оценка потенциала и перспективности реализации технического проекта с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения*
2. *Планирование и формирование графика работ по разработке технического проекта*
3. *Составление сметы технического проекта*

Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей)

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику

.

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
доцент	Попова Светлана Николаевна	к.э.н.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
3-5Г3А1	Зайцев Игорь --		

7.1 Планирование работ по реализации технического проекта

Для выполнения работ по проектированию электропривода погружного насоса формируется рабочая группа, в состав которой входят руководитель и инженер. Необходимо спланировать, составить перечень этапов и работ в рамках технического проектирования, провести распределение исполнителей по видам работ. Результаты планирования и распределения исполнителей по видам работ сведены в таблицу 2.

Таблица 2 - План разработки выполнения этапов технического проекта

Основные этапы	№ раб	Содержание работ	Должность исполнителей
Разработка технического задания	1	Составление и утверждения технического задания	Руководитель
Выбор направления исследования	2	Подбор и изучение материалов по теме технического задания	Руководитель Инженер
	3	Ознакомление с технической документацией	Инженер
Теоретические и расчетные исследования	4	Расчет технологической части	Инженер
	5	Электромагнитный расчет двигателя	Инженер
	6	Выполнение графиков, схем	Инженер
Оценка полученных результатов	7	Проверка выполненных расчетов	Руководитель Инженер
Разработка технической и экономической документации	8	Разработка раздела БЖД	Инженер
	9	Разработка Экономического раздела	Инженер
Оформление и проверка отчета по выполненной работе	10	Оформление пояснительной записки	Инженер
	11	Проверка пояснительной записки	Руководитель Инженер
	12	Устранение недочетов и исправление ошибок	Инженер
	13	Окончательная проверка устраненных недочетов и ошибок	Руководитель Инженер
Итоги проделанной работы	14	Подготовка к защите технического проекта	Руководитель Инженер
	15	Защита технического проекта	Руководитель Инженер

В приведенной выше таблице 5 номерам работ соответствуют следующие виды работ:

№ 1 Составление и утверждения технического задания- включение первичной информации об объекте, формулировку требований к техническому проекту, составление задания и плана на работу;

№ 2 Подбор и изучение материалов по теме технического задания- ознакомление с предметом работы, изучение различных источников, касающихся различных сторон технического проекта;

№ 3 Ознакомление с технической документацией- изучение источников технической документации;

№ 4 Расчет технологической части расчет технологической части электропривода погружного насоса;

№ 5 Электромагнитный расчет двигателя;

№ 6 Выполнение графиков, схем выполнение графиков, схем для технологической части и расчетной части двигателя;

№ 7 Проверка выполненных расчетов - проверка расчетов технологической части и расчетов двигателя;

№ 8 Разработка раздела БЖД

№ 9 Оформление пояснительной записки - оформление записки согласно методическим указаниям по подготовке и защите ВКР;

№ 10 Проверка пояснительной записки - проверка разделов пояснительной записки;

№ 11 Устранение недочетов и исправление ошибок – устранение недочетов, ошибок после первичной проверки технического проекта;

№ 12 Окончательная проверка устраненных недочетов и ошибок;

№ 13 Подготовка к защите технического проекта – подготовка иллюстрированного материала работы;

№ 14 Защита технического проекта;

7.1.1 Определение трудоемкости выполнения работ

Трудоемкость выполнения технического проекта оценивается экспертным путем в человеко-днях и носит вероятностный характер, т.к. зависит

от множество трудно учитываемых факторов. Для определения ожидаемого (среднего) значения трудоемкости $t_{ожі}$ используется следующая формула [22] :

$$t_{ожі} = \frac{3t_{\min i} + 2t_{\max i}}{5},$$

где $t_{ожі}$ - ожидаемая трудоемкость выполнения i -ой работы чел.-дн;

$t_{\min i}$ -минимально возможная трудоемкость выполнения заданной i -ой работы (оптимистическая оценка: в предложении наиболее благоприятного стечения обстоятельств), чел.-дн;

$t_{\max i}$ - максимально возможная трудоемкость выполнения заданной i -ой работы (пессимистическая оценка: в предложении наиболее неблагоприятного стечения обстоятельств), чел.-дн.

Продолжительность работ для раз
работки технического проекта представлены в таблице 6

7.1.2 Разработка графика выполнения технического проекта

В качестве графика выполнения технического проекта можно использовать диаграмму Ганта.

Таблица 3 - Продолжительность работ по разработки технического проекта чел.дн.

№ раб	Название работы	Руководитель			Инженер		
		Минимальное, максимальное и ожидаемое время разработки технического проекта					
		t_{\min}	t_{\max}	$t_{ожг}$	t_{\min}	t_{\max}	$t_{ожг}$
1	Составление и утверждения ТЗ	1	1	1	-	-	-
2	Подбор и изучение материалов по теме технического задания	2	4	3	13	15	14
3	Ознакомление с технической документацией	-	-	-	10	13	11
4	Расчет технологической части	-	-	-	5	8	6
5	Электромагнитный расчет двигателя	-	-	-	4	7	5
6	Выполнение графиков, схем	-	-	-	2	5	3
7	Проверка выполненных расчетов	1	1	1	1	1	1
8	Разработка раздела БЖД	-	-	-	9	12	10
9	Разработка Экономического раздела	-	-	-	9	12	10
10	Оформление пояснительной записки	-	-	-	11	14	12
11	Проверка пояснительной записки	1	1	1	1	1	1
12	Устранение недочетов и исправление ошибок	-	-	-	1	3	2
13	Окончательная проверка устраненных недочетов и ошибок	1	1	1	1	1	1
14	Подготовка к защите технического проект	1	1	1	2	5	3
15	Защита технического проекта	1	1	1	1	1	1
	Итого			9			80

На основание таблицы 6 строится календарный план-график. График строится для ожидаемого по длительности исполнения работ в рамках технического проекта по месяцам и декадам (10 дней)

Таблица 4- Календарный план-график разработки технического проекта

№ работ	Вид работ	Исполнители	t _{ож} , чел. дн.	Продолжительность выполнения работ										
				март			апрель			май			июнь	
				1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2
1	Составление и утверждение ТЗ	Руководитель	1	-										
2	Подбор и изучение материалов по теме технического задания	Руководитель Дипломник	3 14	-										
3	Ознакомление с технической документацией	Дипломник	11											
4	Расчет технологической части	Дипломник	6											
5	Электромагнитный расчет двигателя	Дипломник	5											
6	Выполнение графиков, схем	Дипломник	3											
7	Проверка выполненных расчетов	Руководитель Дипломник	1 1											
8	Разработка раздела БЖД	Дипломник	10											
9	Разработка Экономического раздела	Дипломник	10											
10	Оформление пояснительной записки	Дипломник	12											
11	Проверка пояснительной записки	Руководитель Дипломник	1 1											
12	Устранение недочетов и исправление ошибок	Дипломник	2											
13	Окончательная проверка устраненных недочетов и ошибок	Руководитель Дипломник	1 1											
14	Подготовка к защите технического проекта	Руководитель Дипломник	1 3											
15	Защита технического проекта	Руководитель Дипломник	1 1											

Исходя из составленного графика, можно сделать вывод, что продолжительность работ занимает 11 декад, начиная с первой декады марта и заканчивая во второй декаде июня.

7.2 Составление сметы технического проекта

При планировании сметы технического проекта должно быть обеспечено полное и достоверное отражение всех видов расходов, связанных с его выполнением. В процессе формирования сметы технического проекта используется группировка затрат по следующим статьям:

1. Материальные затраты технического проекта;
2. Полная заработная плата исполнителей;
3. Отчисления во внебюджетные фонды;
4. Накладные расходы.

Материальные затраты в данном техническом проекте не рассчитываются, так как необходимые материалы для технического проекта включены в накладные расходы.

7.2.1 Полная заработная плата исполнителей

В настоящую статью включается основная и дополнительная заработная плата всех исполнителей, непосредственно участвующих в выполнении работ поданной теме. Величина расходов по заработной плате определяется исходя из трудоемкости выполняемых работ и действующей системы окладов и тарифных ставок. Расчет полной заработной платы осуществляется следующим образом:

$$З_{\text{зн}} = З_{\text{осн}} + З_{\text{доп}},$$

где $З_{\text{осн}}$ - основная заработная плата;

$З_{\text{доп}}$ - дополнительная заработная плата.

Основная заработная плата ($Z_{осн}$) исполнителя рассчитывается по следующей формуле:

$$Z_{осн} = Z_{дн} \cdot T_p,$$

где $Z_{осн}$ - основная заработная плата одного работника;

$Z_{дн}$ - среднедневная заработная плата работника, руб;

T_p - продолжительность работ, выполняемых работником, раб. дн.

Среднедневная заработная плата рассчитывается по формуле:

$$Z_{дн} = \frac{Z_{мс} + Z_{допл} + Z_{р.к.}}{F_{д}},$$

где $Z_{мс}$ - оклад по тарифной ставке, руб;

$Z_{допл}$ - доплата и надбавки, руб;

$Z_{р.к.}$ - районная доплата, руб;

$F_{д}$ - количество рабочих дней в месяце (26 при 6- дневной рабочей неделе, 22 при 5- дневной рабочей неделе), раб. дн.

Районная доплата составляет 30,2%

Продолжительность рабочих дней у руководителя составляет 9 дней, у инженера 80 дней.

Расчет основной заработной платы исполнителей приведен в таблице 5

Таблица 5- Расчет основной заработной платы

Исполнители	Оклад по тарифной ставке, руб.	Доплаты и надбавки, руб.	Районная Доплата, руб.	Зарплата месячная, руб.	Средняя заработная плата в день, руб.	Продолжительность работ, раб. дн.	Основная заработная плата, руб.
Руководитель	33600	2000	7575	36357	1398	9	12585
Инженер	12500	-	2407	14907	573	80	45867
Итого							58452

Расчет полной заработной платы ведется по следующей формуле:

$$З_{пол} = K_{доп} \cdot З_{осн}$$

где $K_{доп}$ - коэффициент дополнительной заработной платы;

Расчет полной заработной платы приведен в таблице 6

Таблица 6 – Расчет полной заработной платы исполнителей

Исполнители	Коэффициент дополнительной заработной платы	Основная заработная плата, руб.	Дополнительная заработная плата, руб.	Полной заработной платы, руб.
Руководитель	0,15	12585	1887	14472
Инженер	0,12	45867	5504	51371
Итого		58452	7391	65843

7.2.2 Отчисления во внебюджетный фонды (страховые отчисления)

В данной статье расходов отражаются обязательные отчисления по установленным законодательством Российской Федерации нормам органам государственного социального страхования(ФССО, пенсионного фонда (ПФ) и медицинского страхования (ФФОМС) от затрат на оплату труда работников.

Величина отчислений во внебюджетный фонды определяется исходя из следующей формулы:

$$З_{внеб} = K_{внеб} \cdot (З_{осн} + З_{доп}),$$

где $K_{внеб}$ - коэффициент отчисления на уплату во внебюджетные фонды.

На 2018г. В соответствии с Федеральным закона от 24.07.2009 №212-ФЗ установлен размер страховых взносов равный 30,2%.

Отчисления во внебюджетные фонды составят:

$$З_{внеб}=0,32 \cdot 65843=21070$$

7.2.3 Накладные расходы

Накладные расходы учитывают прочие затраты организации, не включенные в предыдущие статьи расходов: печать и ксерокопирование материалов (ТП), оплата услуг связи, электроэнергии, почтовые и телеграфные расходы, размножение материалов и т.д. величину накладных расходов принимаем в размере 40% от общей суммы затрат.

7.2.4 Формирование сметы технического проекта

Рассчитанная величина затрат технического проекта является основной для формирования бюджета затрат проекта. Определение затрат на технический проект приведен в таблице 7

Таблица 7 - Смета технического проекта

Наименование статьи	Сумма, тыс. руб.	Структура затрат, %
1 Материальные затраты технического проекта	-	-
2 Затраты по полной заработной плате	65843	50
3 Отчисление во внебюджетные фонды	21070	10
4 Накладные расходы	34765	40
Итого	121678	100,0

Исходя из представленной выше таблицы 10, можно сделать вывод, что затраты на реализацию технического проекта составляют 121 тыс. руб.

В результате выполнения поставленных задач по данному разделу, можно сделать следующий вывод:

- при планирование технических работ был разработан график занятости для двух исполнителей, составлена ленточная диаграмма Ганта, позволяющая оптимально скоординировать работу исполнителей.

- составление сметы технического проекта позволило оценить первоначальную сумму затрат на реализацию технического проекта,

Реализация данного технического проекта, позволяет увеличить эффективность производства электропривода погружного насоса путем улучшения энергоэффективности, энергосбережения при внедрении более универсального оборудования, требующего меньше затрат при производстве.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе выполнено:

1. Выбор погружного центробежного насоса;
2. Также произведен выбор и расчет параметров погружного электродвигателя.
3. С помощью программы Matlab 7.0. исследована математическая модель погружного асинхронного электродвигателя во вращающейся системе координат, так и в неподвижной. При создании модели двигателя производились следующие общепринятые допущения: автономный инвертор напряжения является идеальным и представляется апериодическим звеном, то есть напряжение на его выходе строго синусоидальной формы; магнитная система двигателя не насыщена; потери в стали не учитываются; рассматривается трехфазный симметричный режим работы.
4. Исходя, из мощности электродвигателя и технических требований был выбран преобразователь частоты фирмы Электон.
5. В программе Matlab 7.0. была смоделирована работа асинхронного погружного электродвигателя с векторным управлением.
6. Проанализировав графики переходных процессов можно сделать вывод, что спроектированный асинхронный электропривод погружного насоса удовлетворяет техническим требованиям.
7. Также был выполнен расчет кабельной линии и выбор трансформатора для питания погружного насоса.

CONCLUSION

In this work:

1. Selection of a submersible centrifugal pump;
2. The parameters of the submersible motor are also selected and calculated.
3. Using Matlab 7.0. The mathematical model of submerged asynchronous electric motor in a rotating coordinate system and in a stationary one is investigated. When creating the engine model, the following generally accepted assumptions were made: the autonomous voltage inverter is ideal and appears to be an aperiodic link, that is, the voltage at its output is strictly sinusoidal; the magnetic system of the engine is not saturated; losses in steel are not taken into account; the three-phase symmetrical mode of operation is considered.
4. Based on the electric motor power and technical requirements, the Electron frequency converter was chosen.
5. In the program Matlab 7.0. The work of an asynchronous submersible motor with vector control was simulated.
6. After analyzing the graphs of transient processes, it can be concluded that the designed asynchronous electric drive of a submersible pump meets the technical requirements.
7. The calculation of the cable line and the selection of a transformer for feeding the submersible pump were also carried out.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Антонова З.Г. – Практикум в бизнеспланировании. Учебное пособие. Томск: Изд. ТПУ, 1999. – 124 с.
2. Ланграф С. В. – реферат по специальности 05.09.03 «Электротехнические комплексы и системы» на тему «Системы управления асинхронным электроприводом переменного тока».
3. Гарганеев А.Г., Каракулов А. С., Ланграф С. В., Нечаев М. А. Опыт разработки преобразователя частоты для асинхронного электропривода общепромышленного применения//Электротехника.2005№9.с.23-26
4. Булгаков А.А.– Частотное управление асинхронными электродвигателями.– М., «Наука», 1966 г., 298с.
5. Башарин А. В., Новиков В. А., Соколовский Г. Г. - Управление электроприводами: Учебное пособие для вузов. – Л.: Энергоиздат, 1982 г., 392 стр.
6. Бочарников В. Ф; Погружные скважинные центробежные насосы с электроприводом: Учебное пособие. — Тюмень; Издательство «Вектор Бук», 2003.- 336 с.
7. Шрейнер Р. Т., Дмитренко Ю. А. - Оптимальное частотное управление асинхронными электроприводами. – Кишинёв, «Штиинца», 1982 г., 328 стр..
8. Чернышев А.Ю., Чернышев И.А. – Расчёт характеристик электроприводов переменного тока. Ч1.Асинхронный двигатель.: Учебное пособие. – Томск: Изд-во ТПУ ,2005 – 136с.
9. Сарбатов Р. С., Сандлер А. С. – Автоматическое частотное управление асинхронными двигателями. – М., «Энергия», 1974 г.
10. Ланграф С.В. – Асинхронный электропривод, методическое пособие, Томск, 2003 г.
11. Герман-Галкин С.Г.«Компьютерное моделирование полупроводниковых систем в MATLAB 6.0», Учебное пособие.– Спб.: КОРОНА принт, 2001

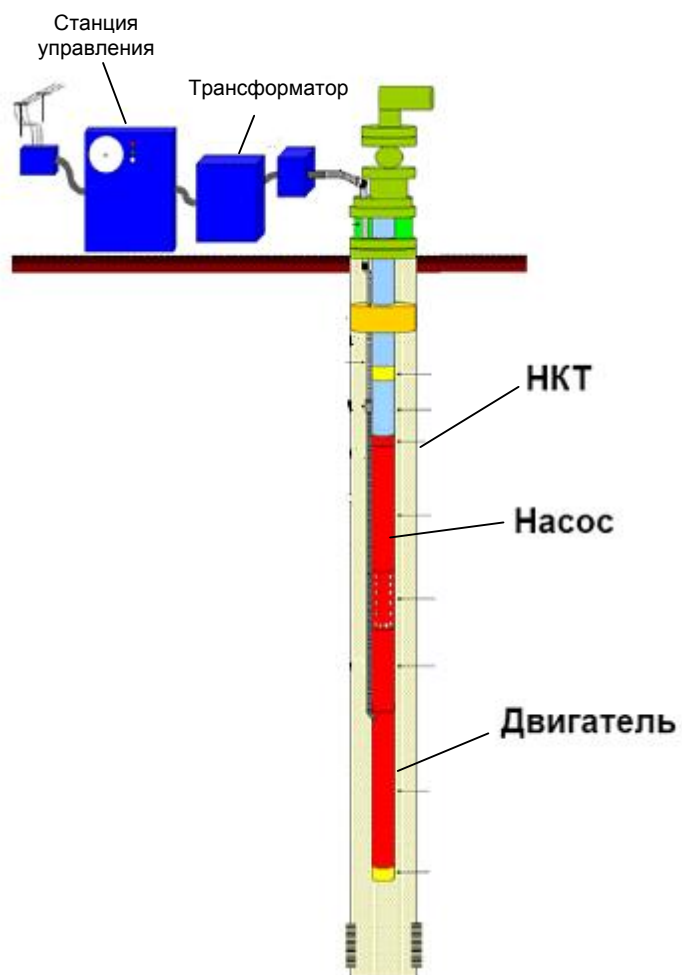
12. Ключев В. И. Теория электропривода: Учеб. Для вузов. – 2-е изд. перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1998. – 704 с.: ил.
13. Криницына З.В., Кудинова А.С., Тарновская Л.И., Ясельская А.И. – Производственный менеджмент. Учебное пособие Томск:Изд.ТПУ, 2002. – 162с.
14. Шрейнер Р. Т. Математическое моделирование электроприводов переменного тока с полупроводниковыми преобразователями частоты. Екатеринбург. УРО РАН, 2000, 654 с.
15. НПБ 105-03 нормы пожарной безопасности. Определение категорий помещений и зданий по взрывоопасной и пожарной опасности.
16. Белов М.П., Новиков В.А., Рассудов Л.Н., Сушников А.А. Автоматизированный электропривод – современная основа автоматизации технологических процессов//Электротехника №5, 2003. – 12-16с.
17. Мощинский Ю.А., Беспалов В.Я., Кирякин А.А. Определение параметров схемы замещения машины по каталожным данным // Электричество, 1998, №4, с. 38 – 42.
18. Автоматизированный электропривод промышленных установок. Под ред. Г.Б. Онищенко. – М.: РАСХН – 2001. – 520 с.: ил.
19. Удут Л. С., Мальцева О.П., Кояин Н.В. Проектирование и исследование электроприводов. Часть 1. – Введение в технику регулирования линейных систем. Часть 2. – Оптимизация контура регулирования: Учебное пособие. – Томск: Изд. ТПУ, 2000. – 144 с.
20. Чернышев А.Ю., Ланграф С.В. Исследование систем векторного управления асинхронным двигателем. Методические указания к выполнению лабораторных работ. – Томск: Изд. ТПУ, 2002. – 22с.
21. Дьяков В.И. Типовые расчеты по электрооборудованию. - М.: "Высшая школа", 1990. - 160 с.: ил.
22. Кузьмина Е.А, Кузьмин А.М. Методы поиска новых идей и решений "Методы менеджмента качества" №1 2003 г.

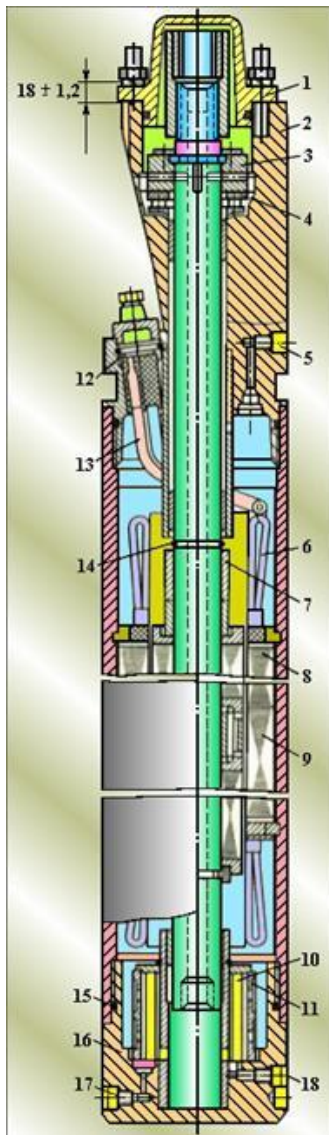
23. Кузьмина Е.А, Кузьмин А.М. Функционально-стоимостный анализ. Экскурс в историю. "Методы менеджмента качества" №7 2002 г.
24. Основы функционально-стоимостного анализа: Учебное пособие / Под ред. М.Г. Карпунина и Б.И. Майданчика. - М.: Энергия, 1980. - 175 с.
25. Скворцов Ю.В. Организационно-экономические вопросы в дипломном проектировании: Учебное пособие. – М.: Высшая школа, 2006. – 399 с.

Приложение А

Графический материал

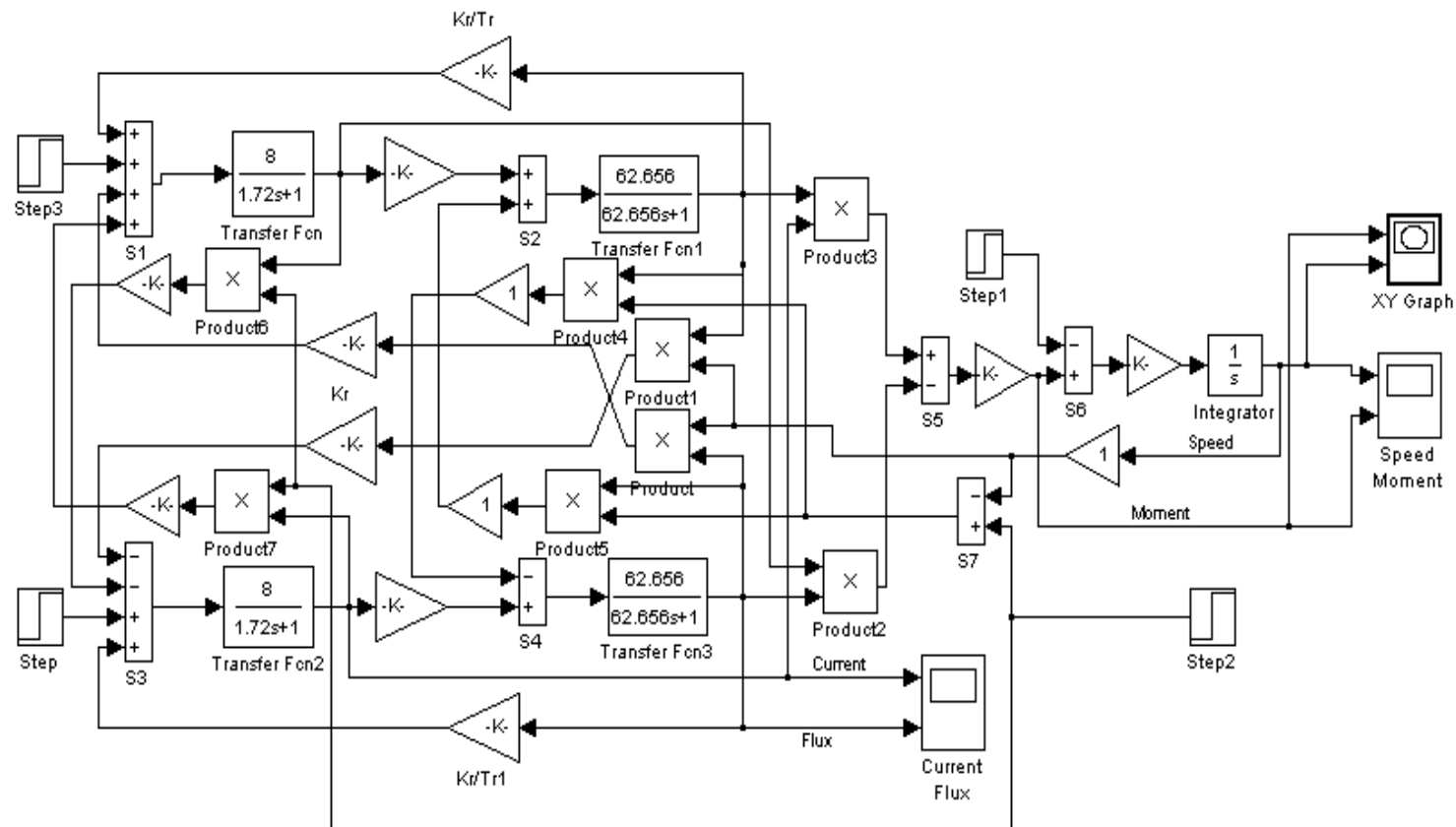
Установка электропривода центробежного насоса.





- 19. Крышка.
- 20. Головка
- 21. Пята
- 22. Подпятник
- 23. Пробка
- 24. Обмотка статора
- 25. Втулка
- 26. Ротор
- 27. Статор
- 28. Магнит
- 29. Фильтр
- 30. Колодка
- 31. Кабель с наконечником
- 32. Кольцо
- 33. Кольцо уплотнительное
- 34. Корпус
- 35. Пробка
- 36. Пробка

Имитационная модель ЭПво



Технические данные и характеристики ПЭДТН22-103В5

$P_n = 22$ кВт, - номинальная мощность двигателя;

$U_n = 700$ В, - линейное напряжение;

$n_n = 3000$ об/мин, - синхронная частота вращения;

$s_n = 5.8\%$, - номинальное скольжение;

$\eta_n = 81\%$, - коэффициент полезного действия в режиме номинальной мощности (100%-я нагрузка);

$\cos \varphi_n = 0.879$ - коэффициент мощности в режиме номинальной мощности;

$L_s \cong L_r = 0.169$ Гн - индуктивность статора и ротора;

$Lls \cong Llr = 2.693 \cdot 10^{-3}$ Гн - индуктивность рассеяния статора и ротора;

$Lm = 0.166$ Гн - взаимоиנדукция;

$J = 0.32$ кг·м² - момент инерции электродвигателя;

$k_i = \frac{I_n}{I_n} = 6$ о.е., - кратность пускового тока;

$k_n = \frac{M_n}{M_n} = 1.8$ о.е., - кратность пускового момента;

$k_{max} = \frac{M_k}{M_n} = 2.2$ о.е., - кратность максимального момента;

$k_{min} = \frac{M_{min}}{M_n} = 1.4$ о.е., - кратность минимального момента;

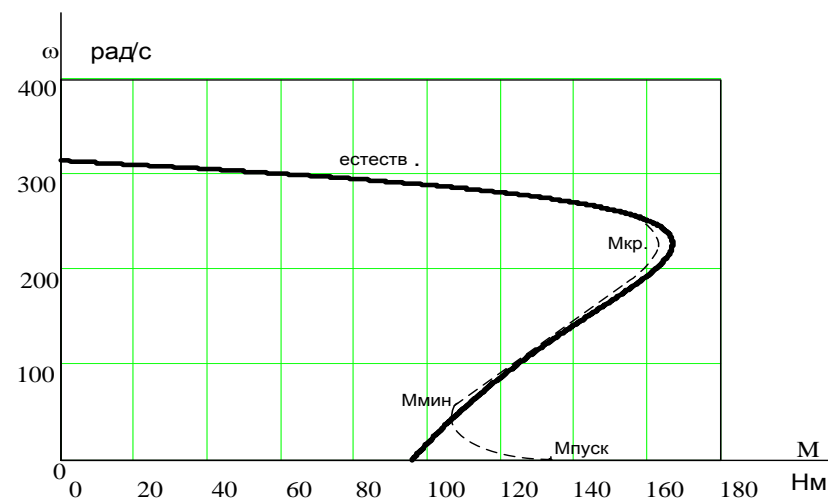
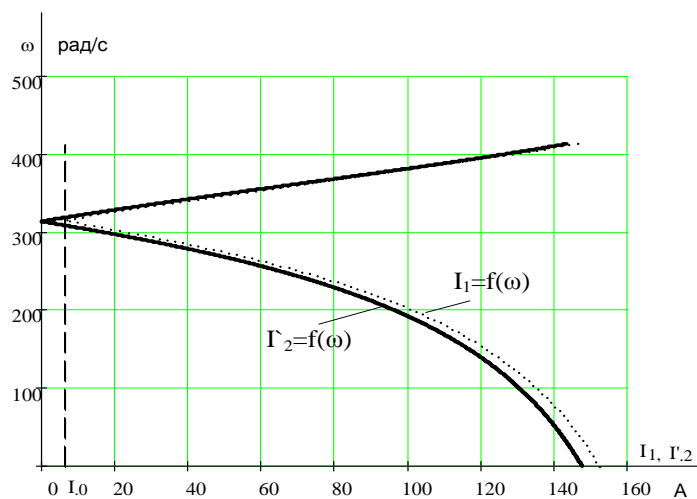
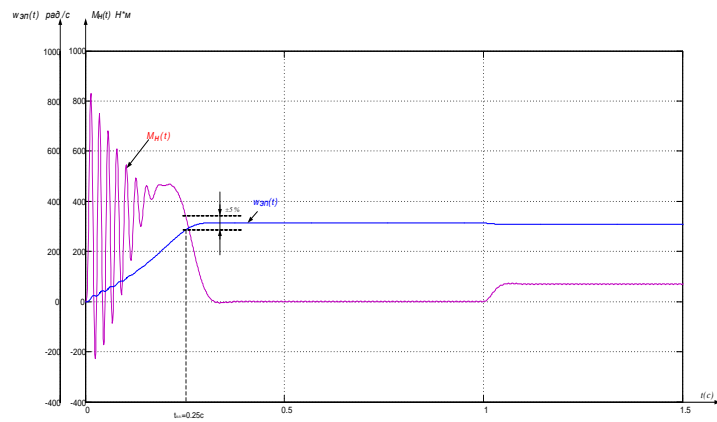


График переходного процесса пуска



Динамическая механическая характеристика

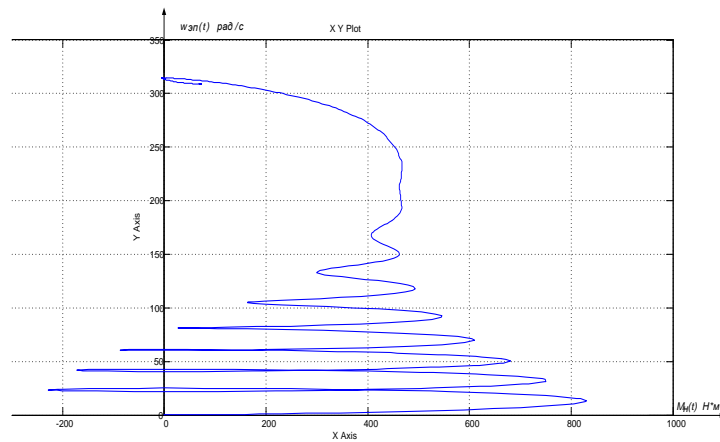


График переходного процесса пуска с задатчиком интенсивности

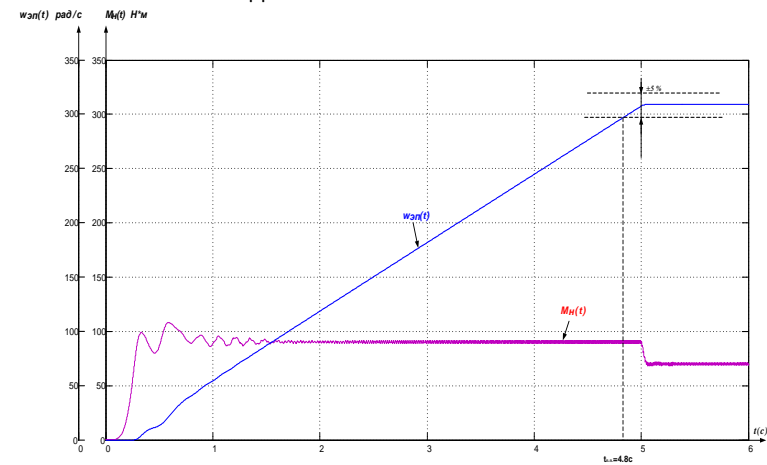
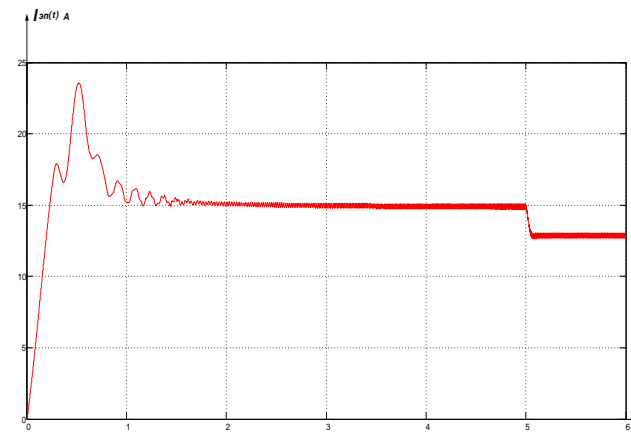


График переходного процесса пуска



Структура расходов

